

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Petra Adamović

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE
UMETKA NOSIVE KONSTRUKCIJE BOLIDA
FORMULE STUDENT USLIJED RAZLIČITIH
OPTEREĆENJA**

Mentor:

Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Student:

Petra Adamović

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Janošu Kodvanju na svojoj pruženoj pomoći, vremenu i povjerenju tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem dr. sc. Martinu Surjaku na korisnim sugestijama u interpretaciji rezultata i tehničkom suradniku Gordanu Plačku za pomoć pri izradi uzoraka.

Također, zahvaljujem svojim roditeljima i sestri na nesebičnoj potpori i podršci tijekom mog dosadašnjeg studiranja.

Na kraju, zahvaljujem se kolegama iz FSB Racing Team-a na svim korisnim savjetima, pomoći i prijateljstvu, a posebno kolegi Marijanu Balašku koji mi je pomogao izraditi testne uzorke za ovaj rad.

Petra Adamović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Petra Adamović**

Mat. br.: 0035198307

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Eksperimentalno ispitivanje umetka nosive konstrukcije bolida
Formule Student uslijed različitih opterećenja**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Experimental investigation of the supporting structure insert of the
Formula Student car under different loading regimes**

Opis zadatka:

Šasija je donji nosivi postroj motornog vozila na koji se pričvršćuje motor sa sustavom prijenosa, ovjes s osovinama, sustav za upravljanje i kočenje te karoserija. Kod bolida Formule Student trenutno je cijevna konstrukcija šasije najčešći izbor, ali u zadnje vrijeme je sve popularnija i ona ljuskastog oblika, tzv. monocoque šasija. S razvojem i praćenjem tehnologije vrhunskih svjetskih proizvođača trkaćih automobila, čelik se sve češće zamjenjuje kompozitnim materijalima. Prihvati za komponente na cijevnoj šasiji su jednostavniji za integriranje i omogućuju veću slobodu naknadnog pozicioniranja. Monocoque šasija s druge strane ne dozvoljava naknadne izmjene, već svi umeci i njihov položaj za prihvat ostalih komponenata moraju biti unaprijed točno definirani.

U radu je potrebno ispitati vezu između umetka i reprezentativnog uzorka kompozitne šasije pri tlačnom i savojnom opterećenju. Pomake tijekom provedbe eksperimenata mjeriti optičkim mjernim sustavom Aramis.

Tijekom rada potrebno je:

1. Upoznati se s radom statičke kralice i pripadajućeg upravljačkog programa.
2. Upoznati se s radom optičkog mjernog sustava za bezkontaktno mjerenje pomaka.
3. Za karakteristični umetak kod monocoque šasije odrediti kritično tlačno i savojno opterećenje koje dovodi do narušavanja integriteta konstrukcije.
4. Odrediti polje pomaka i deformacija na mjestu spoja umetka i kompozitne strukture.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.


2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Janoš Kodvanj

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
1.1. Formula Student	1
1.2. FSB Racing Team	3
1.3. Konstrukcija šasije kroz povijest	7
1.3.1. Šasija ljestvičastog okvira	7
1.3.2. Višecjevna šasija	8
1.3.3. Prostorna rešetka	8
1.4. Monocoque šasija.....	9
1.4.1. Općenito o monocoque šasiji	9
1.4.2. Torzijska krutost	10
1.4.3. Monocoque šasija bolida FS timova	11
1.5. Kompozitni materijali	12
1.5.1. Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti	12
1.5.2. Prepreg	13
1.5.3. Sendvič konstrukcija	15
1.5.4. Dijelovi šasije prema Pravilniku	17
1.5.5. Izbor sendvič konstrukcije monocoque šasije za FSBRT06e	18
2. UMETCI.....	20
2.1. Dio pravilnika koji se odnosi na umetke.....	21
2.2. Podjela umetaka	23
2.2.1. Veličina umetka	24
2.2.2. Standardi	25
2.2.3. Osnovna opterećenja na umetcima	26
2.2.4. Načini pucanja sendvič struktura	26
2.2.5. Smjernice za konstruiranje veza s umetcima	28
3. IZRADA SENDVIČ PANELA S UMETCIMA	30
3.1. Odabir materijala.....	30
3.2. Dimenzije uzoraka	31
3.3. Izrada uzoraka	32
3.4. Priprema uzoraka za testiranje	42
4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE	48
4.1. Optički mjerni sustav <i>Aramis</i>	48
4.1.1. Postupak mjerenja optičkim sustavom <i>Aramis</i>	49
4.1.2. Priprema mjernog objekta i optičkog mjernog sustava <i>Aramis</i>	50
4.1.3. Kalibracija sustava	51

4.1.4. Veličina i oblik fasete	53
4.2. Testiranje uzoraka tlačnim opterećenjem.....	55
4.3. Testiranje uzoraka opterećenjem na savijanje	57
5. REZULTATI	59
5.1. Rezultati ispitivanja uzoraka pri tlačnom opterećenju	59
5.1.1. Usporedba rezultata sa Revolve NTNU Formula Student timom – testiranja uzoraka tlačnim opterećenjem	61
5.1.2. Pomaci i deformacije uzoraka testiranih tlačnim opterećenjem	62
5.1.3. Zaključci testiranja uzoraka tlačnim opterećenjem.....	67
5.2. Rezultati testiranja uzoraka opterećenjem na savijanje	68
5.2.1. Usporedba rezultata sa Revolve NTNU Formula Student timom – testiranja uzoraka opterećenjem na savijanje	70
5.2.2. Pomaci i deformacije uzoraka testiranih opterećenjem na savijanje	71
5.2.3. Zaključci testiranja uzoraka opterećenjem na savijanje.....	75
6. ZAKLJUČAK.....	76
LITERATURA.....	78
PRILOZI.....	80

POPIS SLIKA

Slika 1.	Natjecanja Formule Student u svijetu	2
Slika 2.	Logo FSB Racing Team-a	3
Slika 3.	Mercedes-Benz 300SL: a) šasija [3] i b) model [4]	7
Slika 4.	Šasija ljestvičastog oblika – WWU Formula Student Team [5]	7
Slika 5.	Višecijevna šasija modela Maserati Alfieri [5]	8
Slika 6.	Prostorna rešetka bolida FSBRT05 – Strix [6].....	9
Slika 7.	Usporedba cijevne i monocoque šasije [7].....	9
Slika 8.	Funkcionalni prikaz šasije [5]	10
Slika 9.	Reakcija šasije na prepreku na jednom kotaču [7]	11
Slika 10.	Chamlers Formula Student 2013 - hibridna šasija [5].....	11
Slika 11.	Tkanje vlakana a) obično tkanje (engl. <i>plain weave</i>) [10], b) dijagonalno tkanje (engl. <i>twill weave</i>) [11] i c) satensko tkanje (engl. <i>satin weave</i>) [12].....	13
Slika 12.	Prepreg [13]	13
Slika 13.	Proizvodnja preprega i pečenje konačnog proizvoda [14]	14
Slika 14.	Autoklav tvrtke Rimac Automobili [15]	15
Slika 15.	Shematski prikaz sendvič strukture [9]	15
Slika 16.	Sendvič konstrukcije po zonama za nosivu konstrukciju bolida FSBRT06e.....	18
Slika 17.	Vrste ispuna kod FS timova: a) aluminijsko saće [18], b) aramidno saće [19], c) Rohacell pjena [20]	19
Slika 18.	Definicija veličine ćelije.....	19
Slika 19.	Shematski prikaz primjera sklopa umetka: a) poprečni presjek, b) uzdužni presjek	20
Slika 20.	Aluminijski umetak u monocoque šasiji [23].....	21
Slika 21.	Vijak na simetrali cijevi [4]	22
Slika 22.	Shematski prikaz umetaka: a) potpuno prolazni umetak, b) umetak koji je potpuno uronjen u ljepilo, c) umetak koji je djelomično uronjen u ljepilo [22]	23
Slika 23.	Načini opterećenja umetaka: a) vlak, b) smik, c) savijanje,.....	26
Slika 24.	Smjernice za konstruiranje: a) ispravan postupak, b) i c) neispravan postupak....	28
Slika 25.	Umetci opterećeni vertikalnim silama.....	28
Slika 26.	Konstrukcije opterećene momentima	28
Slika 27.	Prijenos momenata preko umetaka koji su djelomično uronjeni u ljepilo	29
Slika 28.	Prijenos momenta preko prolaznog umetka	29
Slika 29.	Ispuna od aramidnih saća	30
Slika 30.	Ugljična vlakna tvrtke <i>TeXtreme</i> ®.....	30
Slika 31.	Aluminijski umetak	30
Slika 32.	Shematski prikaz sendvič konstrukcije [24].....	31
Slika 33.	Dimenzije uzorka izrezanog iz sendvič konstrukcije	31
Slika 34.	Priprema radne površine: a) označavanje, b) definirana radna površina	32
Slika 35.	Raspored uzoraka u sendvič konstrukciji	32
Slika 36.	Izrezivanje provrta za umetke	33
Slika 37.	Aramidno saće s definiranim uzorcima, provrtima za umetke i ispunu sa smolom	33
Slika 38.	Umetak prije i nakon brušenja.....	34
Slika 39.	Izrada predloška za rezanje ispitnih uzoraka i brušenje provrta za umetke	34
Slika 40.	Nanošenje <i>release agent</i> -a na radnu površinu.....	35

Slika 41.	Miješanje smole i otvrdnjivača.....	35
Slika 42.	Laminiranje kore sendvič konstrukcije	36
Slika 43.	Postavljanje ispune na koru sendviča	36
Slika 44.	Nanošenje smole na umetke	37
Slika 45.	Pozicionirani umetci unutar sendviča.....	37
Slika 46.	Postavljanje tkanine za odjeljivanje	38
Slika 47.	Postavljanje <i>breatex</i> tkanine.....	38
Slika 48.	Postavljanje cjevčice podtlačne pumpe	39
Slika 49.	Sustav pod tlakom	40
Slika 50.	Uklanjanje tkanine za odjeljivanje s gotovog sendviča.....	40
Slika 51.	Površina sendvič panela: a) strana koja je bila okrenuta peel-ply tkanini, b) strana na koja je bila okrenuta prema stolu, c) detaljniji prikaz slike a) i d) detaljniji prikaz slike b)	41
Slika 52.	Izrezivanje uzoraka iz sendvič panela	42
Slika 53.	Izrezani sendvič paneli	42
Slika 54.	Bušenje provrta u sendvič panelima.....	43
Slika 55.	Sklop sendviča s umetkom i vijkom.....	43
Slika 56.	Sustav tlačnog opterećenja sendviča	44
Slika 57.	Sustav opterećivanja sendviča na savijanje.....	45
Slika 58.	Čelična ploča s provrtom za glavu vijka	45
Slika 59.	Nanošenje bijele mat boje na ispitne uzorke	46
Slika 60.	Nanošenje uzorka crnih točkica na ispitne uzorke	46
Slika 61.	Prikladna tekstura na površini uzorka za mjerenje optičkim sustavom <i>Aramis</i>	47
Slika 62.	Sušenje uzoraka	47
Slika 63.	Optički mjerni sustav <i>Aramis</i>	48
Slika 64.	Kalibriranje optičkog sustava <i>Aramis</i>	51
Slika 65.	Parametri sustava <i>Aramis</i> koji se podešavaju za odabrani mjerni volumen.....	52
Slika 66.	Faseta veličine 15 x 15 piksela, s dva preklapajuća piksela.....	53
Slika 67.	Prikaz faseta snimaka od 0 do 5	54
Slika 68.	Eksperimentalni postav za ispitivanje uzoraka pri tlačnom opterećenju	55
Slika 69.	Uzorak T1 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka.....	56
Slika 70.	Uzorak T2 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka.....	56
Slika 71.	Uzorak T3 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka.....	56
Slika 72.	Eksperimentalni postav kod ispitivanja uzoraka savijanjem.....	57
Slika 73.	Uzorak S1 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka.....	58
Slika 74.	Uzorak S2 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka.....	58
Slika 75.	Uzorak S3 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka.....	58
Slika 76.	Dijagram sila-pomak za uzorak T1	59
Slika 77.	Dijagram sila-pomak za uzorak T2	59
Slika 78.	Dijagram sila-pomak za uzorak T3	60
Slika 79.	Dijagram sila-pomak za uzorke T1, T2 i T3	60
Slika 80.	Dijagram sila-pomak tlačnog ispitivanja uzoraka FS tima <i>Revolve NTNU</i> [7].....	61
Slika 81.	Polje pomaka uzorka T1 na 125. snimku	62
Slika 82.	Položaj izabrane točke za dobivanje dijagrama ukupni pomak-snimak.....	62
Slika 83.	Dijagram ukupni pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka T1	63
Slika 84.	Polje pomaka uzorka T2 na 121. snimku	63
Slika 85.	Dijagram ukupni pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka T2	64
Slika 86.	Polje pomaka uzorka T3 na 128. snimku	64
Slika 87.	Dijagram ukupni pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka T3	65
Slika 88.	Dijagrami pomak-snimak za karakterističnu točku uzoraka T1, T2 i T3.....	65

Slika 89.	Polje deformacija uzorka T3 prije prvog popuštanja strukture	66
Slika 90.	Polje deformacija uzorka T3 nakon prvog oštećenja strukture	66
Slika 91.	Polje deformacija uzorka T3 nakon pojave drugog oštećenja strukture	66
Slika 92.	Dijagram moment savijanja-pomaku za uzorak S1	68
Slika 93.	Dijagram moment savijanja-pomak za uzorak S2.....	68
Slika 94.	Dijagram moment savijanja-pomak za uzorak S3.....	69
Slika 95.	Dijagram sile-pomak za uzorke S1, S2 i S3	69
Slika 96.	Dijagram ovisnosti sile o pomaku za opterećenje uzoraka na savijanje FS tima <i>Revolve NTNU</i> [7]	70
Slika 97.	Polje pomaka uzorka S1 na 86. snimku lijeve i desne kamere.....	71
Slika 98.	Dijagram pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka S1	71
Slika 99.	Polje pomaka uzorka S2 na 57. snimku obje kamere.....	72
Slika 100.	Dijagram pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka S2	72
Slika 101.	Polje pomaka uzorka S3 na 201. snimku	73
Slika 102.	Dijagram pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka S3	73
Slika 103.	Dijagrami pomak-snimak za karakterističnu točku uzoraka S1, S2 i S3	74
Slika 104.	Polje deformacija uzorka S2 za snimak 57	74

POPIS TABLICA

Tablica 1. Raspodjela bodova na <i>Formula Student</i> natjecanjima [1].....	2
Tablica 2. Bolidi FSB Racing Team-a	4
Tablica 3. Razvoj nosive konstrukcije – šasijske FSB Racing Team-a [2]	5
Tablica 4. Tip šasijske najboljih FS timova.....	6
Tablica 5. Promjena svojstava povećanjem poprečnog presjeka sendvič konstrukcije [16]..	16
Tablica 6. Osnovne zone šasijske prema FSAE 2018 pravilniku	17
Tablica 7. Inicijalna sendvič konstrukcija za FSBRT06e	18
Tablica 8. Usporedba umetaka	24
Tablica 9. Popis standarda za umetke [22].....	25
Tablica 10. Načini pucanja sendvič struktura	27
Tablica 11. Parametri kalibracijskog objekta.....	55
Tablica 12. Iznosi maksimalnih sila za uzorke T1, T2 i T3	60
Tablica 13. Iznosi sila i momenata savijanja za uzorke S1, S2 i S3	69

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
FS	Formula Student
FSAE	Formula zajednica automobilskih inženjera (engl. <i>Formula Society of Automotive Engineers</i>)
WRC	Svjetsko rally prvenstvo (engl. <i>World Rally Championship</i>)
DTM	Njemačko rally prvenstvo (njem. <i>Deutsche Tourenwagen Meisterschaft</i>)
Riteh	Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet
FESB	Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu
FSB	Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu
FER	Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu
EFZG	Ekonomski fakultet u Zagrebu
PMF	Prirodoslovno-matematički fakultet u Zagrebu
PFZG	Pravni fakultet u Zagrebu
FSBRT05	Kodni naziv za 5. bolid FSB Racing Team-a
FSBRT06e	Kodni naziv za 6. električni bolid FSB Racing Team-a
SES	Tablični prikaz strukturne jednakosti (engl. <i>Structural Equivalency Spreadsheet</i>)

SAŽETAK

Tema ovog rada je eksperimentalno određivanje karakterističnog tlačnog i savojnog opterećenja koje dovodi do narušavanja integriteta kompozitne sendvič konstrukcije.

U uvodnom dijelu ukratko je predstavljen FSB Racing Team i Formula Student natjecanja, kao i uloga kompozitnih materijala u nosivoj konstrukciji trkaćeg bolid. Prikazan je inicijalni izbor vrste ispuna i ugljičnih vlakana za *monocoque* šasiju električnog bolid FSB Racing Team-a predviđenog za sezonu natjecanja 2019. godine. U drugom poglavlju su opisani umetci koji imaju funkciju nošenja komponenti koje se prihvataju na nosivu konstrukciju bolid te su definirana konstrukcijska ograničenja koja umetci moraju podnijeti kako bi zadovoljili uvjete pravilnika po kojima se konstruira bolid Formule Student.

U trećem poglavlju opisana je izrada uzoraka sendvič strukture s umetcima. U četvrtom poglavlju opisan je postupak eksperimentalnog testiranja uzoraka statičkom kidalicom *Messphysik Beta 50-5* i optičkim mjernim sustavom *Aramis* za bezkontaktno određivanje polja pomaka i deformacija na mjestu spoja umetka i kompozitne strukture. U petom poglavlju prikazani su rezultati maksimalnih sila dobivenih pri tlačnom i savojnom opterećenju zajedno s pripadajućim poljima pomaka i deformacija. Dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima norveškog tima Formula Student *Revolve NTNU*. Zaključci na temelju provedenih ispitivanja dani su u šestom poglavlju.

Ključne riječi: Formula Student, monocoque šasija, umetci, kompozitni materijali, *Aramis*

SUMMARY

In this thesis, an experimental determination of characteristic compressive and bending loads that lead to distortion of a composite structure integrity has been conducted.

In the introduction part, a brief description of FSB Racing Team and Formula Student competitions have been presented, as well as the role of composite materials in the supporting structure of a race car. An initial choice for core and carbon fibres of monocoque chassis have been represented, for FSB Racing Team's electric car scheduled for 2019 competition season. In the second chapter, inserts whose function is the support of all components attached to the chassis have been described along with design constraints the inserts have to carry out to fulfil the requirements of the rulebook of Formula Student.

In the third chapter, the manufacturing process of sandwich structure samples has been described. In the fourth chapter, the procedure of the experimental testing of sandwich samples with *Messphysik Beta 50-5* testing machine along with the *Aramis* contactless optical measuring system for determination of displacement and strain field at the connection point of insert and composite structure has been described. In the fifth chapter, the results of maximum loads of compressive and bending tests have been presented, altogether with their related displacement and strain fields. The given results are afterwards compared with the results acquired from Norwegian Formula Student Team *Revolve NTNU*. The conclusion based on the carried out testings are presented in chapter six.

Key words: Formula Student, monocoque chassis, inserts, composite materials, *Aramis*

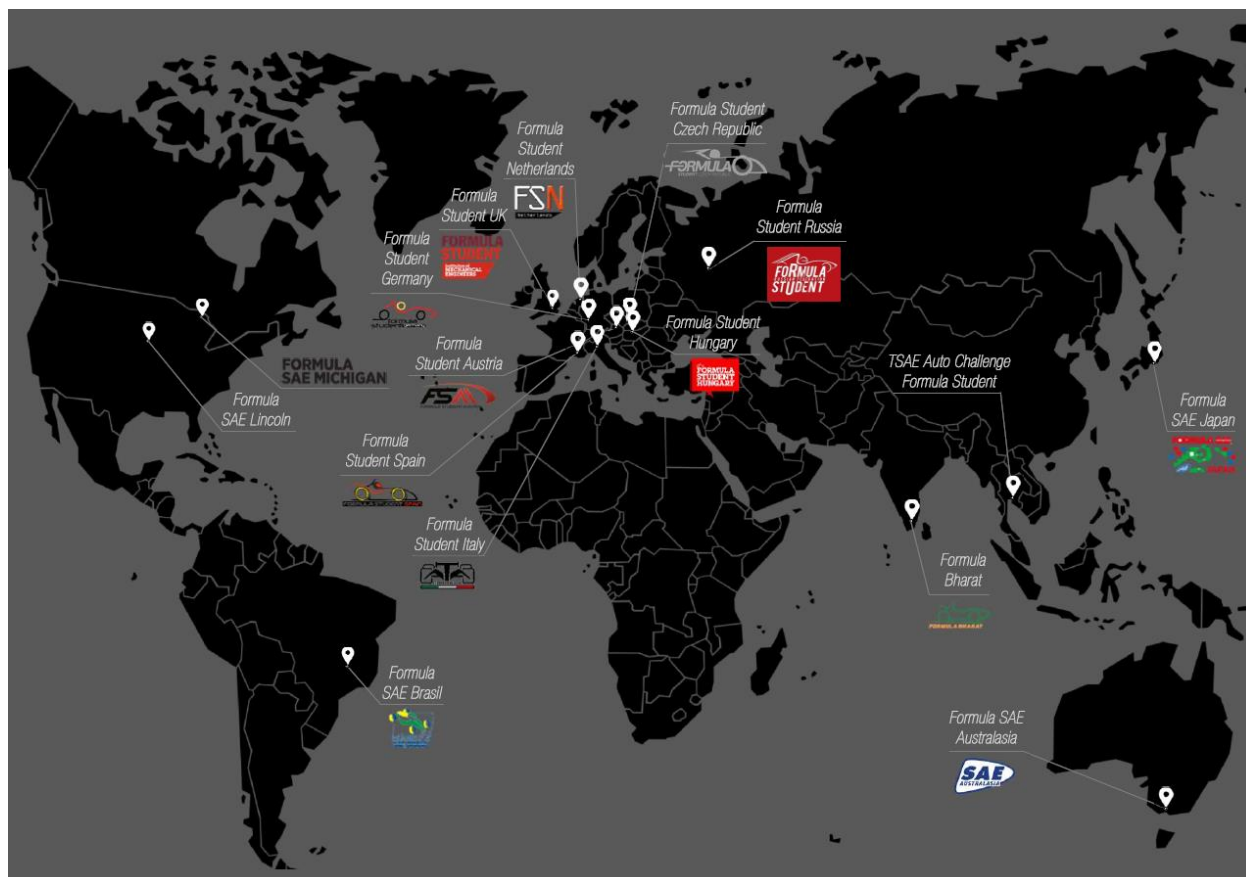
1. UVOD

1.1. Formula Student

Formula Student (FS) natjecanje u organizaciji FSAE (*Formula Society of Automotive Engineers*) slovi za jedno od najprestižnijih inženjerskih natjecanja na svijetu gdje studenti konstruiraju, izrađuju i na kraju sklapaju bolid jednosjed definiran prema vrlo strogom pravilniku. Natjecanje je poznato kao „Formula 1 za studente“, u kojem je za razliku od Formule 1 gdje je cilj pobjeda u utrci s fokusom na vozače, naglasak na tehničkim rješenjima bolida. Na taj način promovira se i potiče inovativnost te razvoj sposobnosti studenata da teoriju naučenu na fakultetu primjenjuju u praksi.

Prvo natjecanje je održano početkom 1980-ih godina u SAD-u te se kasnije proširilo po čitavom svijetu, tako da se danas održava u preko 20 zemalja poput Engleske, Njemačke, Italije, Austrije, Mađarske, Španjolske, SAD-a, Japana i drugih (Slika 1). Samo ocjenjivanje sastoji se od statičkog i dinamičkog dijela. Statički testovi su oni testovi u kojima performanse, brzina i izdržljivost bolida nisu u prvom planu, već se u fokus stavlja njegova pozadina od logistike, organizacije, pripreme do marketinškog, proizvodnog, ekonomskog i poslovnog aspekta cijelog bolida i tima, a sastoje se od Troškovnika auta (engl. *Cost report*), Konstrukcijske izvedbe auta (engl. *Design report*) i Prezentacije poslovnog plana (engl. *Business Plan Presentation*). Dinamički testovi daju uvid u stvarnu trkaću vrijednost kroz finalni test cijele konstrukcijske razrade bolida, a sastoje se od tzv. „osmice“ (engl. *Skid Pad*), utrke ubrzanja (engl. *Acceleration*), autokrosa, (engl. *Autocross*), i utrke izdržljivosti (engl. *Endurance*).

Kako bi tim uopće mogao pristupiti dinamičkim testovima, bolid mora proći tehnički pregled koji se sastoji od tehničke inspekcije, ispitivanja kočenja (engl. *Brake test*), ispitivanja nagnjanja bolida (engl. *Tilt test*) te ispitivanja buke bolida (engl. *Noise test*) koje obavljaju stručnjaci iznimno kompetentnog sudačkog kadra. Oni uglavnom dolaze iz krugova Formule 1, WRC-a (*World Rally Championship*) i DTM-a (*Deutsche Tourenwagen Meisterschaft*). U tablici 1 prikazana je raspodjela bodova navedenih statičkih i dinamičkih testova.



Slika 1. Natjecanja Formule Student u svijetu

Tablica 1. Raspodjela bodova na *Formula Student* natjecanjima [1]

Statički testovi	
Prezentacija poslovnog plana	75 bodova
Troškovnik auta	100 bodova
Konstruktivska izvedba auta	150 bodova
Dinamički testovi	
“Osmica”	75 bodova
Utrka ubrzanja	75 bodova
Autokros	100 bodova
Utrka izdržljivosti	325 bodova
Mjerenje učinkovitosti	100 bodova
Sveukupno:	1000 bodova

1.2. FSB Racing Team






FSB Racing Team (Slika 2), pored Riteh Racing Team-a iz Rijeke i FESB Racing Team-a iz Splita, prva je hrvatska momčad koja već 13 godina aktivno sudjeluje na prestižnim natjecanjima Formule Student. Tim broji 50-tak članova s nekoliko različitih sastavnica Sveučilišta u Zagrebu (FSB, FER, EFZG, PMF, PFZG). Projekt prati i podržava Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Do sada, tim je konstruirao pet benzinskih bolida s kojima je prisustvovao na FS natjecanjima, a to su redom: *Kuna* (2006. g.), *Ris* (2007. g.), *Likos* (2012. g.), *Arctos* (2013. g. i *ArctosR* 2014. g.), te *Strix* (2017. g.). Za nadolazeću 2018. godinu tim planira konstruirati R-verziju *Strix*-a, a također je pokrenuta i konceptualna faza prvog hrvatskog bolida na električni pogon, i to za natjecanje 2019. godine. Jedna od inovacija koja će biti sastavni dio tog električnog bolida jest upravo i monocoque šasija, čiji je opis, skupa s njezinim prednostima i nedostacima, naveden u sljedećem poglavlju.

Kako bi se dobio osjećaj koliko je FSB Racing Team doista napredovao (rezultatima, ali i konstrukcijskim rješenjima) od svog nastanka, u tablici 2 prikazani su bolidi s njihovim natjecateljskim plasmanima i tehničkim specifikacijama. U trećem stupcu tablice nalaze se logotipovi pojedinih FS natjecanja.



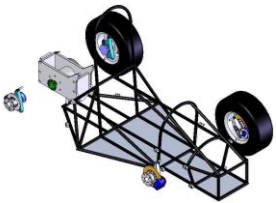

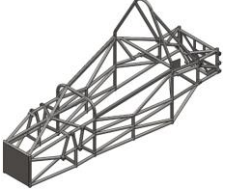
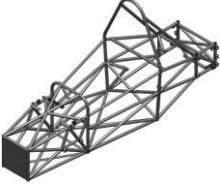
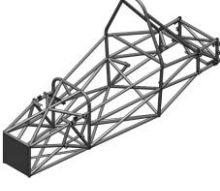
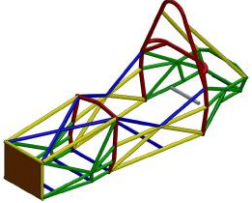
Slika 2. Logo FSB Racing Team-a

Tablica 2. Bolidi FSB Racing Team-a

<p><i>Kuna, 2006.</i></p> 	<p>Motor: Yamaha R6 ECU: Autronic SMC Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni Šasija: Cijevna čelična Oklop: Staklena vlakna Masa bolida: 317 kg Ubrzanje: 5 s Maks. brzina: 160 km/h</p>	<p>35. od 72 tima</p>  <p>FORMULA STUDENT UNIVERSITY OF MECHANICAL ENGINEERS</p>
<p><i>Ris, 2007.</i></p> 	<p>Motor: Yamaha R6 ECU: Autronic SMC Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni Šasija: Cijevna (sprijeda čelik, Al straga) Oklop: Staklena i ugljična vlakna Masa bolida: 270 kg Ubrzanje: 4,5 s Maks. brzina: 160 km/h</p>	<p>48. od 84 tima</p>  <p>FORMULA STUDENT UNIVERSITY OF MECHANICAL ENGINEERS</p>
<p><i>Likos, 2012.</i></p> 	<p>Motor: Yamaha R6 ECU: VEMS Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni Šasija: Cijevna, dvostruka poprečna ramena Oklop: Ugljična i aramidna vlakna Masa bolida: 263 kg Ubrzanje: 4,4 s Maks. brzina: 160 km/h</p>	<p>24. od 103 tima</p>  <p>FORMULA STUDENT UNIVERSITY OF MECHANICAL ENGINEERS</p>
<p><i>Arctos, 2013.</i></p> 	<p>Motor: Yamaha R6 ECU: VEMS Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni Šasija: Cijevna, dvostruka poprečna ramena Oklop: Ugljična vlakna Masa bolida: 230 kg Ubrzanje: 4,4 s Maks. brzina: 144 km/h</p>	<p>56. od 75 timova</p>  <p>formula student <small>germany</small></p>
<p><i>ArctosR, 2014.</i></p> 	<p>Motor: Honda CBR ECU: VEMS Mjenjač: 6 brzina, sekvencijalni Šasija: Cijevna, dvostruka poprečna ramena Oklop: Ugljična i aramidna vlakna Masa bolida: 223 kg Ubrzanje: 4,4 s Maks. brzina: 125 km/h</p>	<p>10. od 97 timova</p>  <p>FORMULA STUDENT UNIVERSITY OF MECHANICAL ENGINEERS</p>
<p><i>Strix, 2017.</i></p> 	<p>Motor: Husqvarna TE610 ECU: VEMS Mjenjač: 4 brzine, sekvencijalni Šasija: Čelična, 25CrMo4 Oklop: Ugljična vlakna Masa bolida: 215 kg Ubrzanje: 5 s Maks. brzina: 110 km/h</p>	<p>13. od 41 tima</p>  <p>FORMULA STUDENT HUNGARY</p>

U tablici 3 dan je pregled razvoja šasijs FSB Racing Team-a, skupa s masom nosive konstrukcije i iznosom torzijske krutosti, čija će važnost biti objašnjena u sljedećim poglavljima.

Tablica 3. Razvoj nosive konstrukcije – šasijs FSB Racing Team-a [2]

Generacija bolida, kodni naziv, puni naziv	CAD model nosive konstrukcije	Masa nosive konstrukcije, kg	Torzijska krutost nosive konstrukcije, Nm/°
2006. FSB-RT01 <i>Kuna</i>		45,5	1080
2007. FSB-RT02 <i>Ris</i>		37,4	1550
2012. FSB-RT03 <i>Likos</i>		35,8	1420
2013. FSB-RT04 <i>Arctos</i>		32,6	1570
2015. FSB-RT04R <i>ArctosR</i>		30,5	1630
2017. FSB-RT05 <i>Strix</i>		29,5	1782

Napomena: Masa šasijs ne sadrži masu prihvata.

U tablici 4 prikazan je plasman prvih trinaest timova na FS Germany 2017 natjecanju, te FS Austria 2017 s tipom šasije pojedinog tima. Šasije koje su popularne na FS natjecanjima su cijevne, hibridne (zadnji kraj od čeličnih cijevi, ostalo kompozitni materijal) te konstrukcija potpunog monocoque-a (engl. *full-monocoque*), no iz ovih podataka se vidi da je *full-monocoque* šasija trenutno najučestalija. Navedeni pojmovi će biti objašnjeni u kasnijim poglavljima.

Tablica 4. Tip šasije najboljih FS timova

Plasman	Ime tima	Tip šasije
	Formula Student Germany 2017	
1.	Stuttgart U	Full monocoque (zatvoreni tip)
2.	Zürich ETH	Full monocoque (otvoreni tip)
3.	München UAS	
4.	Amberg OTH	Full monocoque (zatvoreni tip)
5.	Stuttgart DHBW	Full monocoque (otvoreni tip)
6.	Karlsruhe KIT	Full monocoque (zatvoreni tip)
7.	Barcelona UPC	Full monocoque (otvoreni tip)
8.	Göteborg Chamlers	Full monocoque (zatvoreni tip)
9.	Osnabrück UAS	
10.	Hamburg TU	
11.	Kaiserslautern TU	
12.	Sankt Augustin UAS	Full monocoque (otvoreni tip)
13.	Delft TU	
Formula Student Austria 2017		
1.	TU München	Full monocoque (zatvoreni tip)
2.	Zürich ETH	Full monocoque (otvoreni tip)
3.	Karlsruhe KIT	Full monocoque (zatvoreni tip)
4.	Stuttgart U	
5.	RWTH Aachen University	Full monocoque (otvoreni tip)
6.	Hochschule für angewandte Wissenschaften	Cijevna
7.	Sankt Augustin UAS	Full monocoque (otvoreni tip)
8.	Eindhoven UT	
9.	Barcelona UPC	
10.	Vienna UT	
11.	TH Inglostadt	
12.	Augusburg	
13.	Aalen	

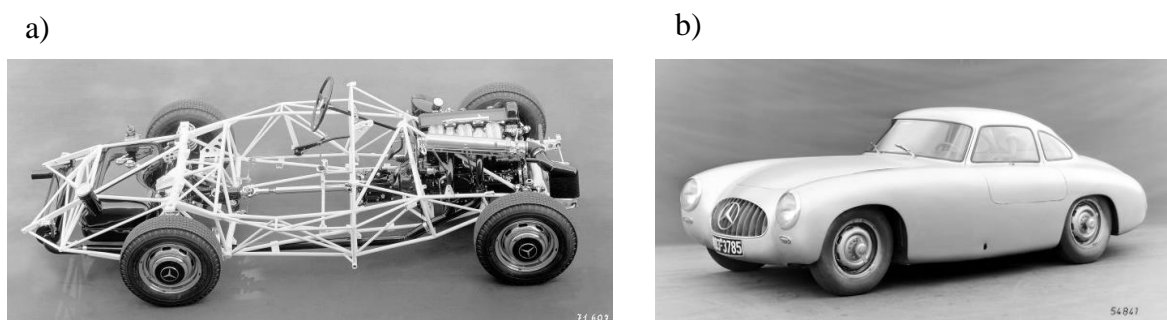
Napomena: Pogon bolida svih timova navedenih u tablici je električni.

1.3. Konstrukcija šasije kroz povijest

U prošlosti su se trkaći automobili proizvodili serijski, što je način konstruiranja koji je više nalikovao izgradnji mostova nego pravom inženjerstvu. Do Drugog svjetskog rata, gotovo svi tipovi šasije su se bazirali na grednom tipu konstrukcije, obično „I“ ili „Z“ oblika.

1.3.1. Šasija ljestvičastog okvira

Mercedes-Benz prvi je predstavio cijevne grede 1937. godine. U takvoj konstrukciji cijevi su paralelne između osovina, a konstrukcija se naziva šasija ljestvičastog oblika (engl. *twin-tube*). To je bilo uobičajeno kod trkaćih automobila sve do ranih 1950-ih, kada su se takvi tipovi šasije počeli pojavljivati u modelima poput Lotus Mark Six i Mercedes-Benz 300SL, prikazan na slici 3.



Slika 3. Mercedes-Benz 300SL: a) šasija [3] i b) model [4]

U 2006. godini studenti Western Washington University-ja konstruirali su šasiju ljestvičastog oblika od ugljičnih vlakana (Slika 4). Konstrukcija koja drži dvije cijevi je izrađena od aluminija, glodanjem.



Slika 4. Šasija ljestvičastog oblika – WWU Formula Student Team [5]

1.3.2. Višecijevna šasija

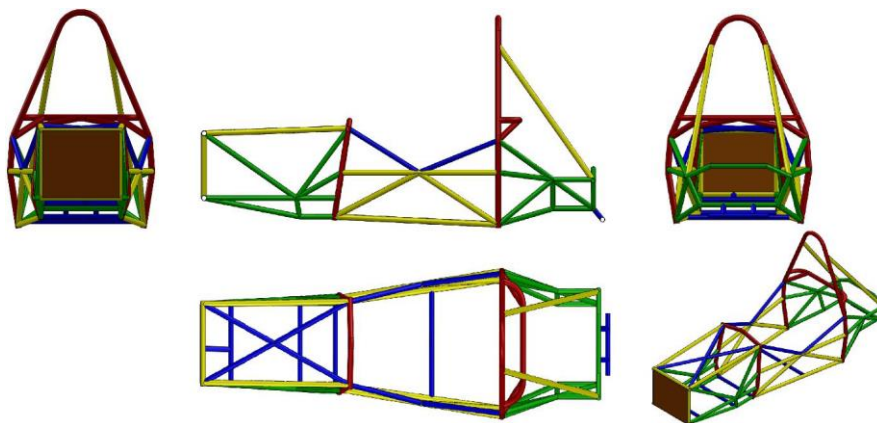
Postoji i tzv. višecijevna šasija pod kojom se podrazumijeva konstrukcija s više od dvije potporne cijevi. To je obično pojam koji opisuje sve tipove šasije osim one ljestvičastog oblika. U praksi, pojam se najčešće odnosi na tip šasije koja sadrži četiri glavne potporne cijevi, no još uvijek se ne može klasificirati kao prava prostorna rešetka. Takva šasija je manje učinkovita, ali se pokazala kao dobar kompromis između šasije ljestvičastog oblika i prostorne rešetke u smislu torzijske krutosti i troškova proizvodnje. Na slici 5 prikazana je višecijevna šasija modela Maserati Alfieri.



Slika 5. Višecijevna šasija modela Maserati Alfieri [5]

1.3.3. Prostorna rešetka

Generalni princip prostorne rešetke jest preuzimanje vlačnih ili tlačnih opterećenja pomoću cijevi. To se postiže zavarivanjem cijevi šasije (engl. *frame members*) u čvorove. U idealnom slučaju, čvorovi apsorbiraju značajni iznos opterećenja pomoću potpornih cijevi u svim smjerovima opterećenja. Budući da su cijevi opterećene samo na vlak ili tlak, moguće je izbjeći savijanje cijevi, koje je glavni razlog gubitka torzijske krutosti. Na slici 6 prikazana je prostorna rešetka posljednjeg FSB Racing Team bolida – Strix.



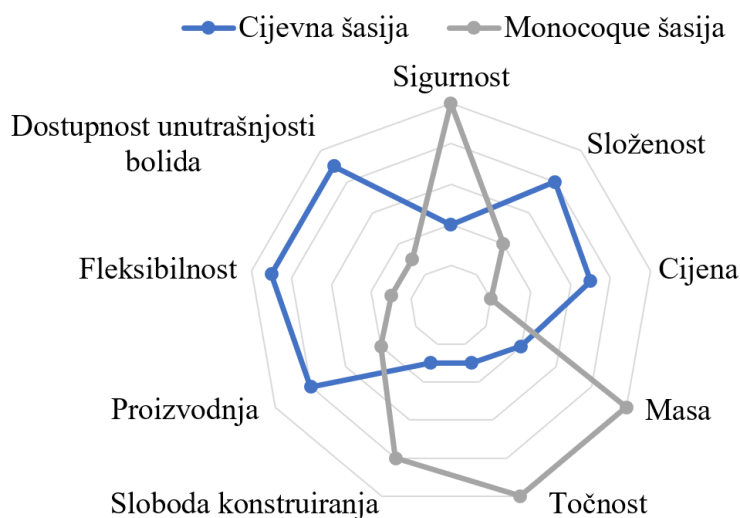
Slika 6. Prostorna rešetka bolida FSBRT05 – Strix [6]

1.4. Monocoque šasija

1.4.1. Općenito o monocoque šasiji

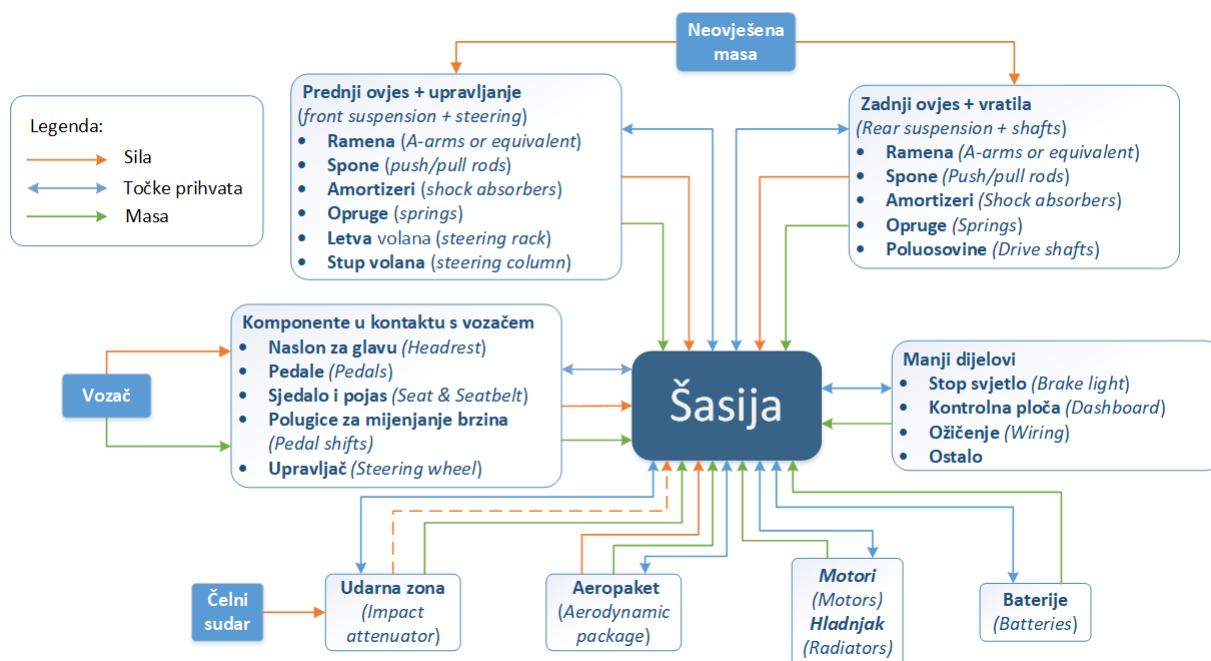
Riječ „*monocoque*“ sastoji se od: „*mono*“ – latinski „jednostruk“ te „*coque*“ – francuski „školjka“. Svoje korijene vuče još iz 1920. godine kada je pad cijene aluminija omogućio objedinjenje konstrukcijskih zahtjeva kao što su krutost, čvrstoća i mala masa za potrebe proizvodnje aluminijevih limova za tadašnje zrakoplove. Pri kraju Drugog svjetskog rata, većina zrakoplova je koristila strukturu monocoque-a.

Monocoque šasija predstavlja glavni strukturni potporanj automobila, preuzimajući sva opterećenja koja dolaze na automobil. U trkaćim automobilima današnjice, najčešći tip monocoque šasije izrađen je od kompozita, npr. od ugljičnih vlakana visoke čvrstoće (engl. *Carbon Fibre Reinforced Polymers* – *CFRP*). Prednosti i nedostaci ovakvog tipa konstrukcije mogu se vidjeti na slici 7.



Slika 7. Usporedba cijevne i monocoque šasije [7]

Na slici 8 dan je funkcionalni prikaz šasije s engleskim nazivima, s ciljem prikaza svih opterećenja koje ona mora preuzeti. Svaki dio naveden na slici, na šasiju je prihvaćen umetkom te samim prihvatom, a jedan od tipa umetaka će se i eksperimentalno testirati u okviru ovog rada.

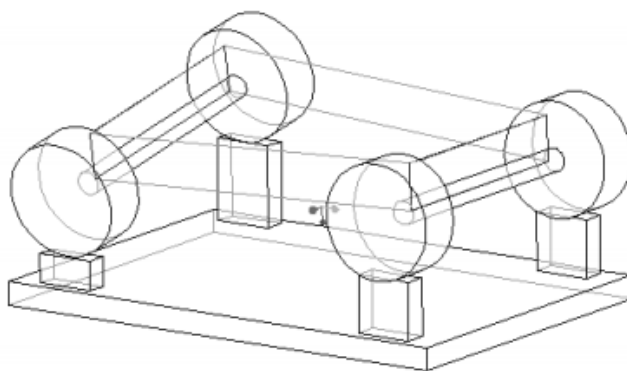


Slika 8. Funkcionalni prikaz šasije [5]

1.4.2. Torzijska krutost

Torzijska krutost je najvažnije svojstvo kada se govori o konstrukciji šasije. Definira se kao otpor torzijskim opterećenjima (momentima) koja djeluju na uzdužnoj osi bolida. Ta opterećenja se najčešće javljaju kod skretanja bolida, a upravo je zadatak torzijske krutosti da ih ravnomjerno rasporedi na ostatak konstrukcije bolida. Generalno se teži što većem iznosu torzijske krutosti, no kako se s njezinim povećanjem masa također povećava, treba težiti optimalnom iznosu [8]. Pri tome je povratna informacija vozača također koristan parametar, budući da oni upravljaju bolidom i znaju kakav odziv šasije im najviše odgovara.

Torzijska opterećenja se pojavljuju u različitim situacijama. Primjer torzijskog opterećenja je kada jedan kotač naiđe na prepreku na cesti, a ostala tri kotača ostaju na svojoj pravocrtnoj putanji (Slika 9). Ta pojava stvara moment na šasiji, a ona je ujedno i standardni način za određivanje torzijske krutosti šasije u računalnim simulacijama, ali i u stvarnosti. Torzijska krutosti izražena je u $\text{Nm}/^\circ$.



Slika 9. Reakcija šasije na prepreku na jednom kotaču [7]

1.4.3. Monocoque šasija bolida FS timova

Monocoque kompozitna šasija je stekla svoju popularnost kod FS timova još prije par godina, a pojavljuje se u dva oblika, kao potpuni monocoque te hibridni monocoque.

Hibridna monocoque šasija je kombinacija kompozitne monocoque šasije na prednjem dijelu i prostorne rešetke na stražnjem (Slika 10). Sama monocoque šasija doprinosi konstrukciji sa svojom malom masom i velikom torzijskom krutošću, dok prostorna rešetka omogućuje jednostavnost konstruiranja stražnjeg dijela, u većini slučajeva dajući lakši pristup motoru. Međutim, komplikacije pri konstruiranju se najviše pojavljuju na mjestu spajanja čeličnog i kompozitnog dijela, najviše kod predviđanja puta prelaska opterećenja s čeličnog dijela na kompozitni i obratno.



Slika 10. Chamlers Formula Student 2013 - hibridna šasija [5]

1.5. Kompozitni materijali

Kako kompozitni materijali prevladavaju kao materijali u ovom radu, u ovom će se poglavlju dati njihova definicija, te će se predstaviti kompozitni materijali za šasiju novog bolida.

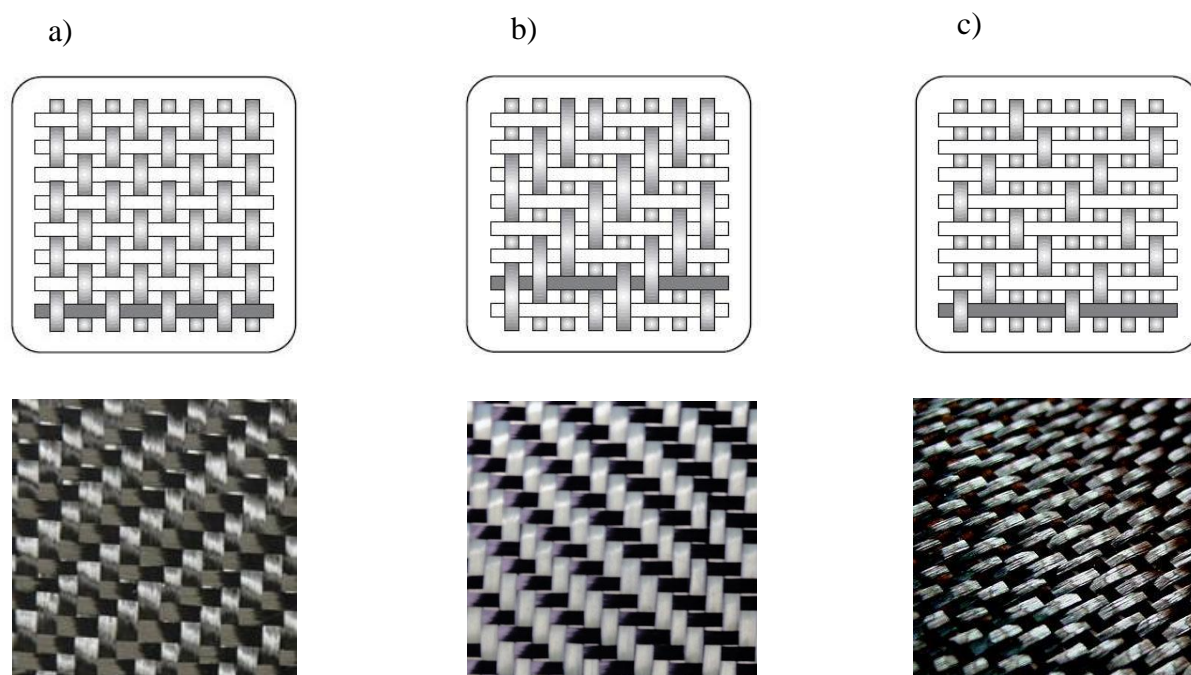
Kompozitni materijali proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe [9]. Na taj način dobivaju se neuobičajene kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, masa, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost, tvrdoća ili vodljivost, što je od posebne važnosti s obzirom na opterećenje nosive konstrukcije trkaćeg bolida.

1.5.1. Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti

Kompoziti koji su posebno zanimljivi kada se govori o monocoque nosivoj konstrukciji jesu vlaknima ojačani kompoziti kod kojih do izražaja dolazi poboljšanje gustoće, žilavosti, krutosti te povećanje omjera čvrstoća/gustoća uslijed ugradnje čvrstih, krutih ili krhkih vlakana u mekaniju, duktilniju matricu. Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna te osigurava duktilnost i žilavost, budući da vlakna nose veći dio opterećenja. Ugljik je visokoučinkovit vlaknasti materijal koji se najčešće primjenjuje za ojačanje suvremenih kompozita s polimernom matricom. Razlozi za to su sljedeći:

1. Ugljična vlakna imaju, od svih vlaknastih materijala za ojačanje, najviši specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću.
2. Veliki iznos modula elastičnosti i čvrstoće zadržavaju i pri povišenim temperaturama.
3. Kod sobne temperature, vlaga i niz otapala, kiselina i lužina ne razaraju ugljična vlakna.
4. Razvijeni su postupci proizvodnje vlakana i kompozita koji su relativno jeftini.

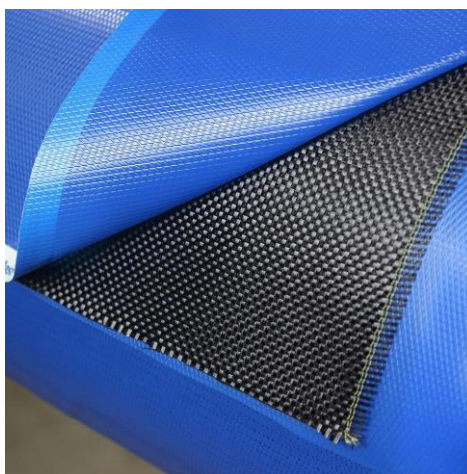
Tkanje vlakna također dolazi u više varijanti, od kojih su najčešće korištena prikazana na slici 11. Usmjerenje vlakana je izraženo u stupnjevima ($^{\circ}$), a izbor usmjerenja ovisi o smjeru opterećenja koje će vlakno prenositi. Zato se na različitim zonama šasije bolida koristi orijentacija vlakana koja će najefikasnije prenositi predviđena opterećenja.



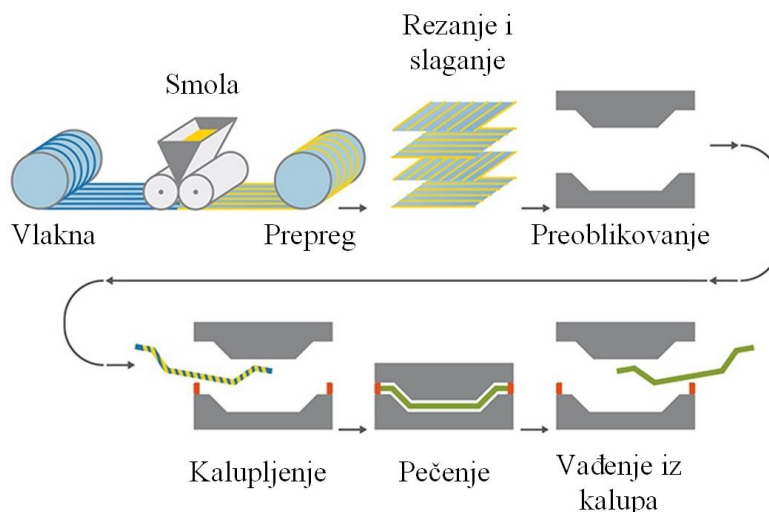
Slika 11. Tkanje vlakana a) obično tkanje (engl. *plain weave*) [10], b) dijagonalno tkanje (engl. *twill weave*) [11] i c) satensko tkanje (engl. *satin weave*) [12]

1.5.2. Prepreg

Specifična vrsta ugljičnih vlakana, odnosno kompozitnog sustava jest prepreg (Slika 12). To je posebno formiran sustav u kojem su ugljična vlakna već u samom proizvodnom postupku impregnirana s minimalnom potrebnom količinom smole (Slika 13).



Slika 12. Prepreg [13]



Slika 13. Produkcija preprega i pečenje konačnog proizvoda [14]

Kod ugljičnih vlakana bez prethodno impregnirane smole, potrebno je ručno nanijeti smolu. Nanošenje smole se radi kako bi se postigla konstrukcija gornjeg sloja (kore) tzv. sendvič konstrukcije, objašnjene u sljedećem poglavlju. Kod ručnog nanošenja smole, vrlo je velika vjerojatnost pogreške u smislu prevelikog, neravnomjernog i/ili premalog nanošenja smole na cijelu površinu ugljičnih vlakana. Zato je prepreg kao materijal izrade kore sendvič konstrukcije šasije vrlo popularan pri izboru kore sendviča konstrukcije. Za izradu umetaka u ovom radu, koristit će se metoda ručnog laminiranja.

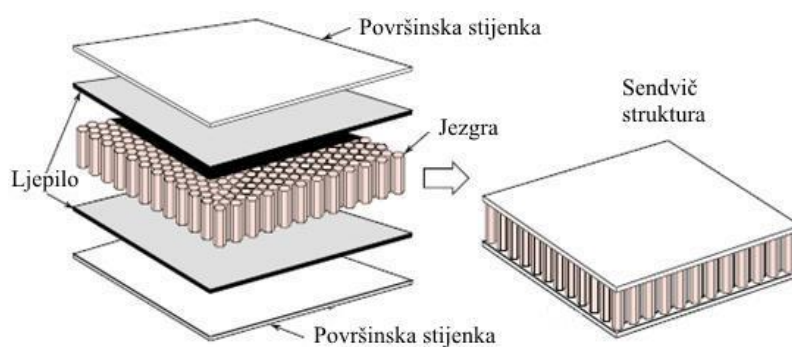
Prednosti preprega jesu maksimalna čvrstoća i modul elastičnosti koji se može „izvući“ iz ugljičnih vlakana sustava. Tim postupkom je količina smole svedena na minimum, dok se kod ručnog laminiranja gotovo uvijek potroši više smole nego što je potrebno. Važno je napomenuti kako je u postupku prikazanom na slici 13 matrica (smola) u tek djelomično očvrstnutom stanju, kako bi se s prepregom moglo lakše rukovati (polagati ga u kalupe, rezati itd.). Nakon što se prepreg izreže i polegne u kalup, uz određenu doradu u smislu stavljanja vakuumskih vreća, tkanine za odijeljivanje i slično, prepreg se postavlja u tzv. autoklav (engl. *autoclave*), (Slika 14), kako bi se dovršio proces otvrdnjavanja matrice i postigla najbolja svojstva materijala. Budući da je matrica u prepregu prije polaganja u autoklav u neočvrstnutom stanju, neizbježno je skladištenje preprega na temperaturama oko -18°C . U suprotnom, matrica će sama očvrstnuti i prepreg viši neće moći postići očekivana mehanička svojstva i kao takav će postati neupotrebljiv.



Slika 14. Autoklav tvrtke Rimac Automobili [15]

1.5.3. Sendvič konstrukcija

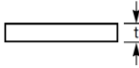
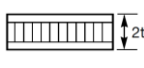

Sendvič konstrukcije sastoje se od tankih vanjskih slojeva spojenih, ali i razdvojenih, s lakim materijalom za popunjavanje, kao što je npr. polimerna pjena. Niti materijal za popunjavanje niti vanjski slojevi ne trebaju biti čvrsti niti kruti, a sendvič posjeduje oba svojstva. Upravo se ovakav tip materijala koristi za izradu monocoque šasijske kod Formula Student bolida jednosjeda. Na slici 15 je shematski prikazana definicija sendvič konstrukcije.



Slika 15. Shematski prikaz sendvič strukture [9]

S obzirom na to da se od nosive konstrukcije bolida očekuje visoka savojna čvrstoća, krutost i rastezna čvrstoća, potrebno je povećati poprečni presjek sendvič strukture. Zahvaljujući upravo svojstvima takve strukture, navedeni parametri se uz povećanje presjeka mogu povećati i do nekoliko puta bez znatnog povećanja mase cijele strukture, kao što je vidljivo iz tablice 5.






Tablica 5. Promjena svojstava povećanjem poprečnog presjeka sendvič konstrukcije [16]

	Puni materijal	Debljina jezgre (t)	Debljina jezgre (3t)
			
Krutost	1,0	7,0	37,0
Savojna čvrstoća	1,0	3,5	9,25
Masa	1,0	1,03	1,06

1.5.4. Dijelovi šasije prema Pravilniku

Prije samog odabira sendvič strukture za pojedini dio šasije, prikazat će se definicija podjele zona šasije prema Pravilniku FSAE 2018. kako bi se dobila slika o materijalu šasije bolida FSBRT06e, a također i tome u kakvom će se okruženju nalaziti umetci koji će se ugraditi i testirati. Zone su prikazane u tablici 6.

Tablica 6. Osnovne zone šasije prema FSAE 2018 pravilniku

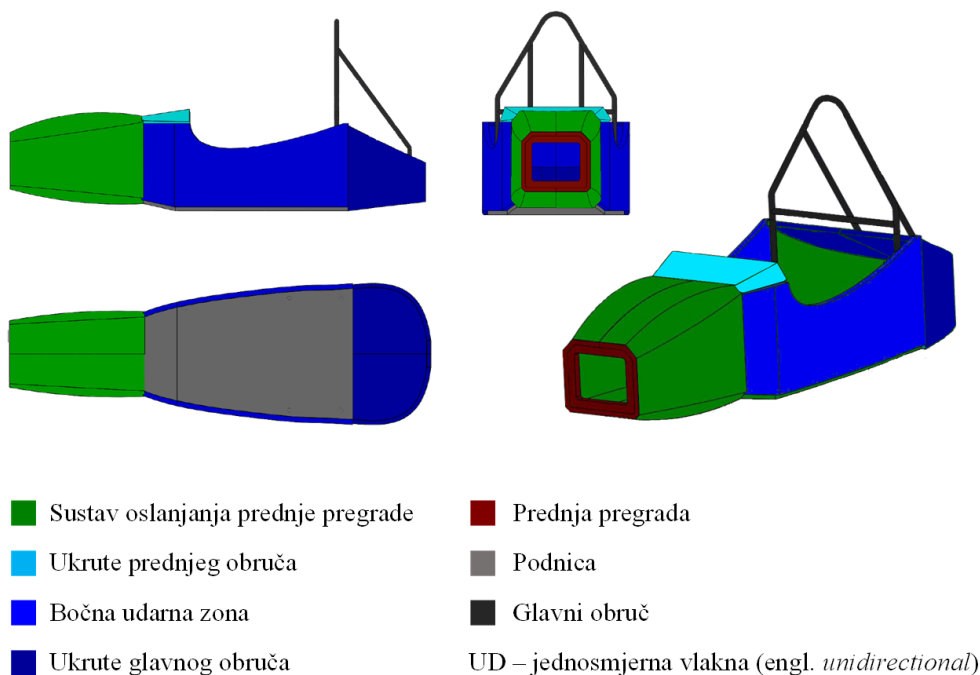
Pravilo br.	Zona šasije (crveno na slikama)	Opis pravila (slika ili tekst) [17]
T3.36	Ukrute prednjeg obruča (engl. <i>Front Hoop Bracing</i>)	
T3.31	Prednja pregrada (engl. <i>Front Bulkhead</i>)	
T3.32	Sustav oslanjanja prednje pregrade (engl. <i>Front Bulkhead Support</i>)	
T.3.33	Bočna udarna zona (engl. <i>Side Impact Structure</i>)	
T3.33	Podnica (engl. <i>Side Impact Structure – Floor</i>)	Unutarnji dio šasije – podnica
T3.36	Ukrute glavnog obruča (engl. <i>Main Hoop Bracing Support</i>)	

1.5.5. Izbor sendvič konstrukcije monocoque šasije za FSBRT06e

U ovom potpoglavlju predstaviti će se izbor sendvič konstrukcije za novi bolid. Bitno je naglasiti kako CAD model šasije vidljiv na slikama predstavlja tek prvu iteraciju dizajna nosive konstrukcije. U tablici 7 prikazani su parametri kao što je tip i debljina jezgre, broj slojeva preprega i kutovi slaganja, odnosno usmjerenja ugljičnih vlakana. Tablica je popraćena slikom 16 na kojoj se jasno vidi raspodjela pojedinih vrsta sendvič konstrukcije kod bolida.

Tablica 7. Inicijalna sendvič konstrukcija za FSBRT06e

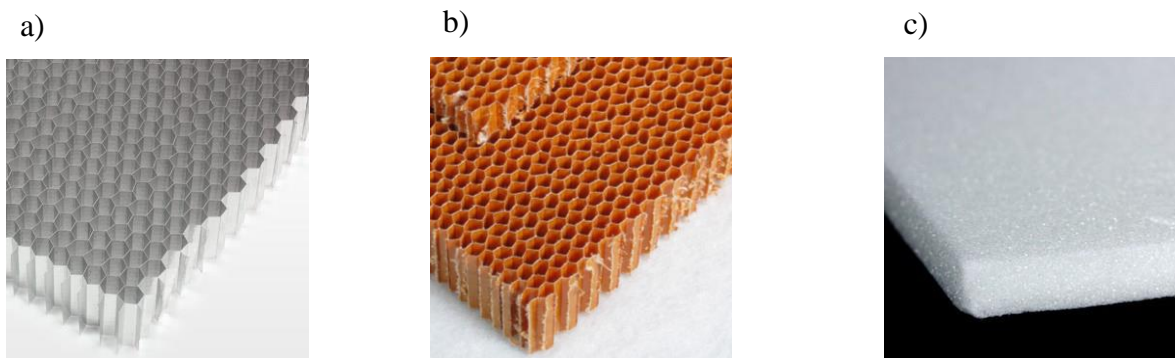
Zona	Tip/debljina jezgre	Broj slojeva preprega na jednoj strani sendviča	Kutovi slaganja
Ukrute prednjeg obruča	Aramid/25 mm	3	[Jezgra/0/45/0] _s
Prednja pregrada	Rohacell/30 mm	5	[Jezgra0/45/0/45/0] _s
Sustav oslanjanja prednje pregrade	Aramid/25 mm	3	[Jezgra/0/45/0] _s
Bočna udarna zona	Aramid/28 mm	5	[Jezgra/0/+45UD/45/-45UD/0] _s
Podnica	Aramid/28 mm	5	[Jezgra/0/+45UD/45/-45UD/0] _s
Ukrute glavnog obruča	Aramid/25 mm	4	[Jezgra/0/45/45/0] _s



Slika 16. Sendvič konstrukcije po zonama za nosivu konstrukciju bolida FSBRT06e

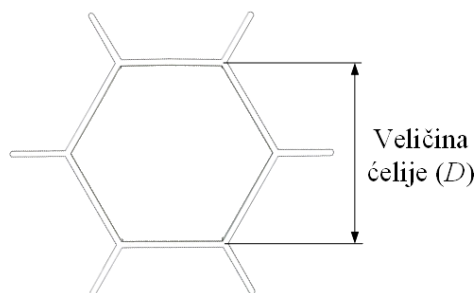
Što se odabira materijala ispune i vlakana tiče, većina timova koristi ugljična vlakna, dok su staklena i aramidna vlakna manje zastupljena. Neki timovi koriste aramidna vlakna u kombinaciji s ugljičnim, no FSB Racing Team odlučio je ne koristiti aramidna vlakna jer se takva vlakna ponekad znaju skrutiti unutar matrice i narušiti svojstva cijelog kompozita. Ugljična vlakna stoga prevladavaju kod odabira, a najpopularniji je već spomenuti sustav preprega.

Što se tiče ispuna (jezgre) kod sendvič kompozita nosivih konstrukcija Formula Student bolida, najpopularnije je aluminijsko saće, aramidno saće (Kevlar, Nomex) i Rohacell pjena (Slika 17). Sva tri tipa ispune dolaze u različitim debljinama i gustoćama, ovisno o proizvođaču. Kod saćastih ispuna (aluminij i aramid), dimenzije saća također dolaze u različitim veličinama.



Slika 17. Vrste ispuna kod FS timova: a) aluminijsko saće [18], b) aramidno saće [19], c) Rohacell pjena [20]

Iako je kod većih dimenzija saća masa niža, pa se time u konačnici dobiva lakši bolid, moguća je pojava izvijanja stjenki ćelija uslijed opterećenja na šasiji kod većih dimenzija ćelija. Dobiva se i manja kontaktna površina s korom ugljičnih vlakana pa postoji opasnost od delaminacije (odvajanja vlakana od saća). Zbog toga se FSB Racing Team odlučio za najmanju veličinu aramidnih saća, kojima je $D = 3,2 \text{ mm}$ (Slika 18) nauštrb veće mase.

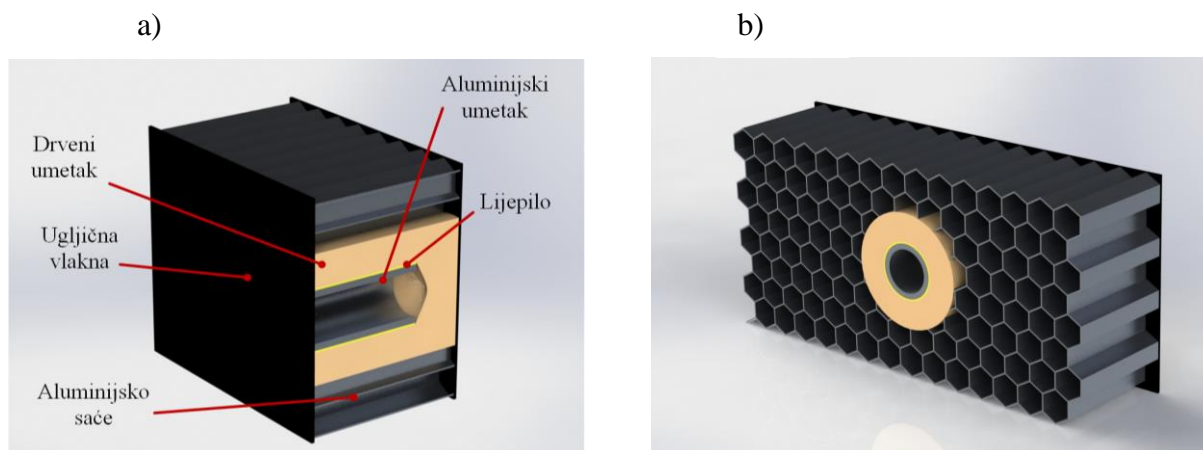


Slika 18. Definicija veličine ćelije

2. UMETCI

Umetak u šasiji je neodvojivi dio konstrukcije koji predstavlja vezu između ispuna sendviča i ostalih dijelova poput prihvata, okvira, profila, nosača itd. [23]. Može biti izrađen od kompozita ili metala, a osnovna mu je zadaća prijenos opterećenja na veću površinu te samim time i smanjenje koncentracije naprezanja.

Struktura se može sastojati od odvojivog i fiksnog elementa. Dio koji je zamjenjiv je ili vijak ili drugi navojni element prihvaćen na navoj u umetku. Kada se jednom ugradi u šasiju, fiksni element se ne može zamijeniti niti se na njemu mogu raditi ikakve naknadne promjene. On je ljepilom spojen za saće i vlakna u šasiji. Jedan od primjera takve strukture je prikazan na slici 19.



Slika 19. Shematski prikaz primjera sklopa umetka: a) poprečni presjek, b) uzdužni presjek

U ovom primjeru, umetak je izrađen od drva, a u sebi sadrži dodatni umetak izrađen od aluminijske cijevi koji je ljepilom pričvršćen za drvo. Drvo je također ljepilom pričvršćeno za aluminijsko saće. Konkretno, ovim primjerom koristili su se studenti iz Cal Poly Formula SAE Team-a, te su se odlučili na korištenje umetaka oblika jednostavne čahure, bez korištenja prirubnice (Slika 20), a umetci su se nalazili na prihvatima prednjeg ovjesa, prednjih amortizera i sklopa pedala.



Slika 20. Aluminijski umetak u monocoque šasiji [23]

2.1. Dio pravilnika koji se odnosi na umetke

Prije podjele umetaka, opisa njihove mehaničke prirode, načina opterećenja, kompatibilnosti i načina spajanja sa saćastom monocoque strukturom, navest će se ograničenja iz već spomenutog pravilnika za konstruiranje Formula Student bolida, koji će služiti kao svojevrsna vodilja predstojećim eksperimentalnim ispitivanjima.

T3.39 Prihvati umetaka monocoque šasije

T3.39.1 Svaka točka prihvata monocoque-a i drugih primarnih struktura (ostali tipovi nosivih konstrukcija) mora u bilo kojem smjeru izdržati silu od 30 kN.

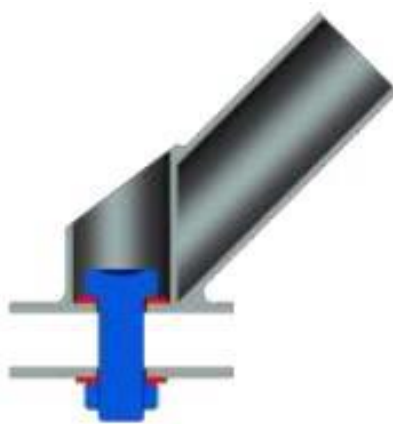
T3.39.2 Laminati, ukrute, potporne ploče i umetci moraju imati dovoljnu krutost, smičnu čvrstoću, savojnu čvrstoću i površinu zavaru kako bi izdržali definiranu silu od 30 kN u bilo kojem smjeru. Podaci dobiveni ispitivanjem smične čvrstoće laminata koriste se kao dokaz da postignuta smična čvrstoća zadovoljava.

Dokaz da su ukrute zadovoljavajuće krutosti mora biti dokumentiran u SES-u (engl. *Structural Equivalency Spreadsheet*). Proračuni provedeni ručno ili pomoću MKE uz ručni proračun su prihvatljivi. Korištenje samo MKE nije dozvoljeno.

T3.39.3 Svaka točka prihvata zahtijeva minimalno dva vijka M8 kvalitete 8.8.

T3.39.4 Svaku točku prihvata potrebno je osigurati čeličnom potpornom pločom s minimalnom debljinom od 2 mm. Alternativni materijali se smiju koristiti za potporne ploče ako je postignuta ekvivalentnost.

T3.39.5 Ukruta prednjeg obruča, ukruta glavnog obruča te ukrute glavnog obruča smiju imati samo jedan vijak M10 kvalitete 8.8, kao alternativu pravilu T3.39.3, ako je vijak na simetrali cijevi kao što je prikazano na slici 21.



Slika 21. Vijak na simetrali cijevi [4]

T3.40 Točke prihvata pojaseva vozača kod monocoque-a

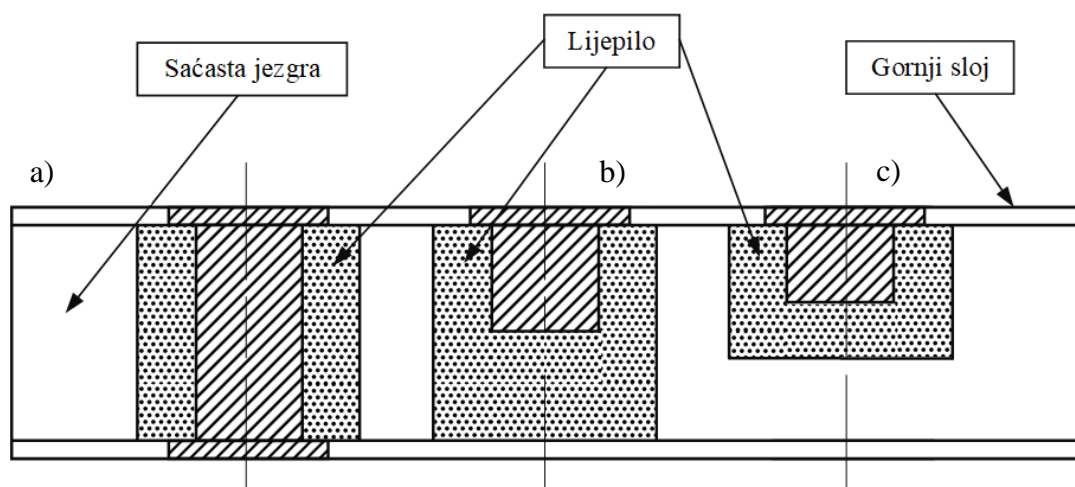
T3.40.1 Monocoque točke prihvata pojaseva za ramena i krilo (engl. *lap*) moraju izdržati silu od 13 kN.

T3.40.2 Monocoque točke prihvata za pojaseve protiv podlijetanja vozača (engl. *anti-submarine belts*) moraju izdržati silu od 6.5 kN.

T3.40.3 Ako su pojasevi za krilo, ramena i *anti-submarine* pojasevi vezani za isti prihvata, točka prihvata mora izdržati silu od 19.5 kN.

2.2. Podjela umetaka

U osnovi, umetci se dijele na tri osnovna tipa: potpuno prolazni umetak (engl. *through the thickness*) – umetak koji prolazi kroz čitavu debljinu sendvič strukture, umetak koji je potpuno uronjen u ljepilo (engl. *fully potted*) – umetak koji ne prolazi kroz čitavu debljinu, ali njegovo ljepilo da, te umetak koji je djelomično uronjen u ljepilo (engl. *partially potted*) – umetak koji ne prolazi kroz čitavu debljinu kompozita, kao ni njegovo ljepilo. Svi navedeni tipovi prikazani su shematski na slici 22.



Slika 22. Shematski prikaz umetaka: a) potpuno prolazni umetak, b) umetak koji je potpuno uronjen u ljepilo, c) umetak koji je djelomično uronjen u ljepilo [22]

Usporedba mogućnosti prijenosa statičkih opterećenja i uštede na masi za navedene vrste umetaka dana je u tablici 8.

Tablica 8. Usporedba umetaka

Vrsta umetaka	Ušteda mase	Prijenos statičkih opterećenja
Umetak koji je djelomično uronjen u ljepilo (engl. <i>partially potted</i>)	●●●	●
Umetak koji je potpuno uronjen u ljepilo (engl. <i>fully potted</i>)	●●	●●
potpuno prolazni umetak (engl. <i>through the thickness</i>)	●	●●●

Legenda:

- – slabo,
- – umjereno,
- – vrlo dobro.

Podjela umetaka prema vrsti integracije u sendvič strukturu:

- grupa A – za povezivanje sa sendvičem tijekom pečenja,
- grupa B – za već postojeći sendvič koristeći duroplastične smole,
- grupa C – za mehaničko stezanje ili vijčane spojeve u postojećem sendviču.

2.2.1. Veličina umetka

Postoji širok izbor umetaka, s obzirom na njihovu veličinu, oblik i dostupnost dimenzija. Razlog tako nekonvencionalnom pristupu izrade jest u tome što su se umeci počeli proizvoditi paralelno u više zemalja, pa su tako različite tvrtke usvojile različita pravila proizvodnje, pa se razlikuju:

- komercijalno dobavljivi, standardizirani
- nenormirani, konstruirani za kućnu primjenu

2.2.2. Standardi

Mnogo umetaka se kvalificiralo kako bi se približili standardima pojedinih tvrtki, standardima koji su vezani za projekte ili nacionalnim standardima, nakon što su podvrgnuti nacionalnoj provjeri plovidbenosti u zrakoplovnoj industriji, ili običnim nacionalnim inspekcijama. Neki od tih standarda navedeni su u tablici 9.

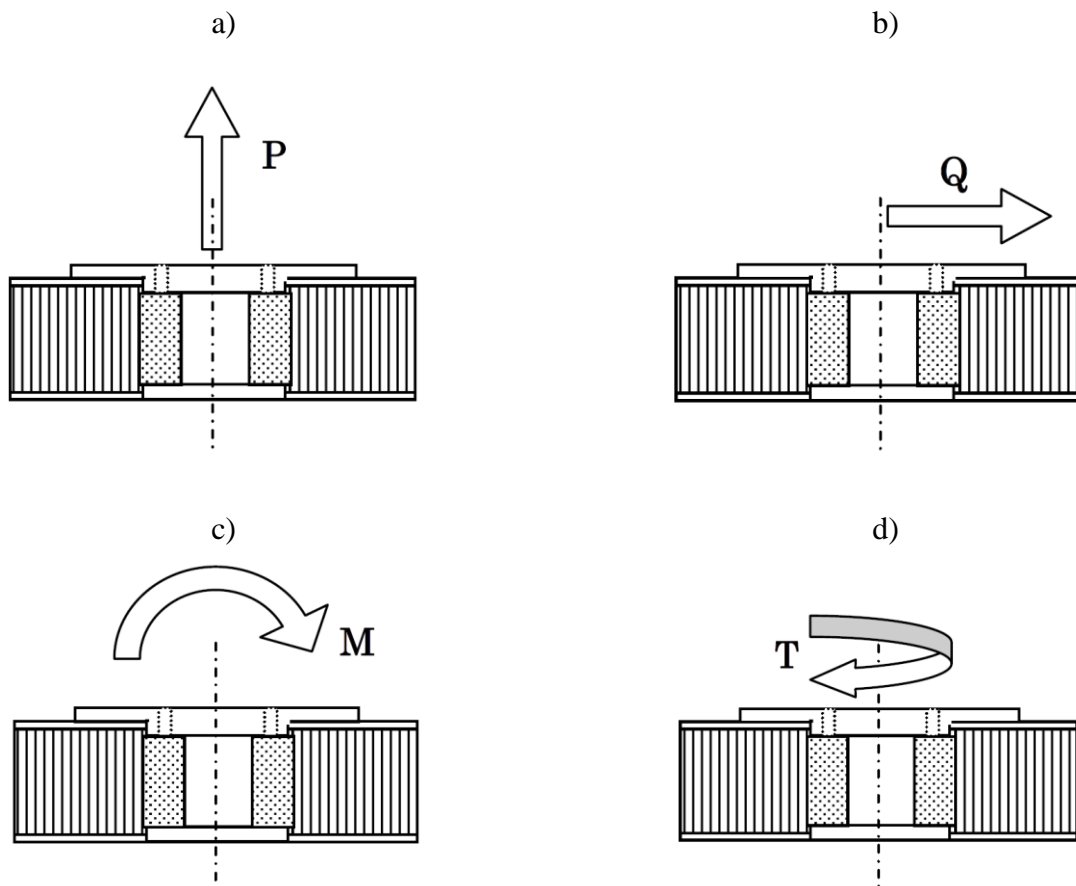
U ovom radu neće se koristiti umetci prema standardima, iz razloga što Formula Student natjecanje nije propisalo nikakva pravila vezana za tematiku poštivanja standarda.

Tablica 9. Popis standarda za umetke [22]

Standard	Kratica	Broj standarda
National Aerospace Standard	NAS	1832, 1833, 1835, 1836, 1837
Deutsches Institut für Normung	DIN	65187, 65188, 65189, 65190, 56191, 65192, 65193
Transall-Norm	TAN	16487, 16488, 16489, 16490
Panavia-Standard	PAN	3825, 3826, 3827, 3828, 3829
Deutsche Airbus-Norm	DAN	214
Normalisation Sud Aviation	NSA	5345, 5074
ERNO-Norm	ENN	366, 377, 379, 386, 398

2.2.3. Osnovna opterećenja na umetcima

Na slici 23 su prikazani osnovni načini opterećenja umetaka. Iako su prikazani umetci s prirubnicama, opterećenja se također odnose i na umetke bez prirubnica.

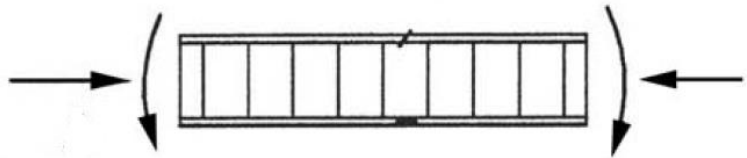
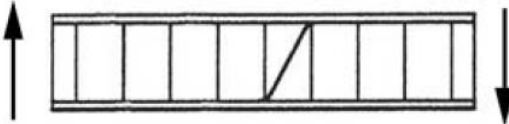
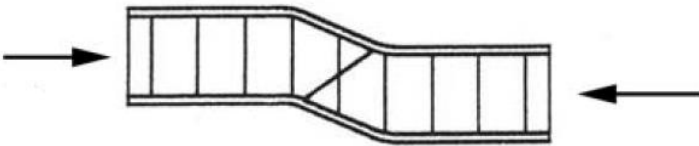
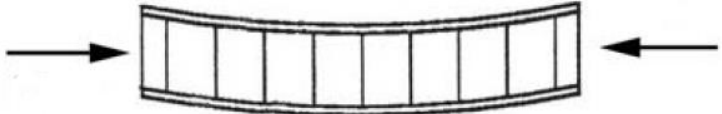
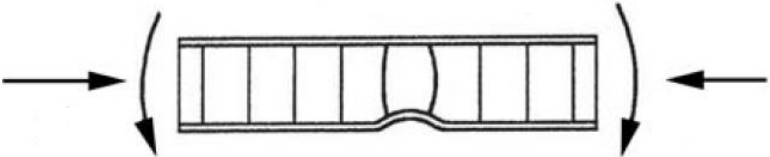
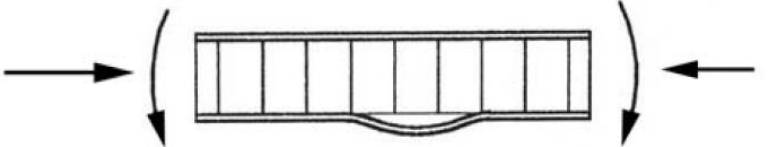
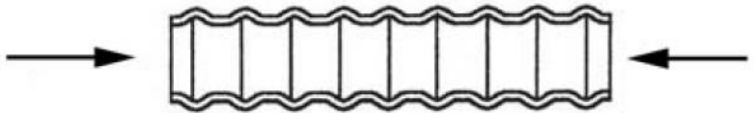
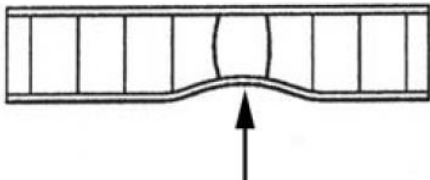


Slika 23. Načini opterećenja umetaka: a) vlak, b) smik, c) savijanje, d) uvijanje [22]

2.2.4. Načini pucanja sendvič struktura

Sendvič paneli pucaju kada su podvrgnuti nekoj vrsti preopterećenja. Mogu pucati na razne načine, ovisno o geometriji, materijalu i vanjskim uvjetima opterećenja. Sažetak najčešćih i najvažnijih tipova pucanja sendviča je prikazan u tablici 10.

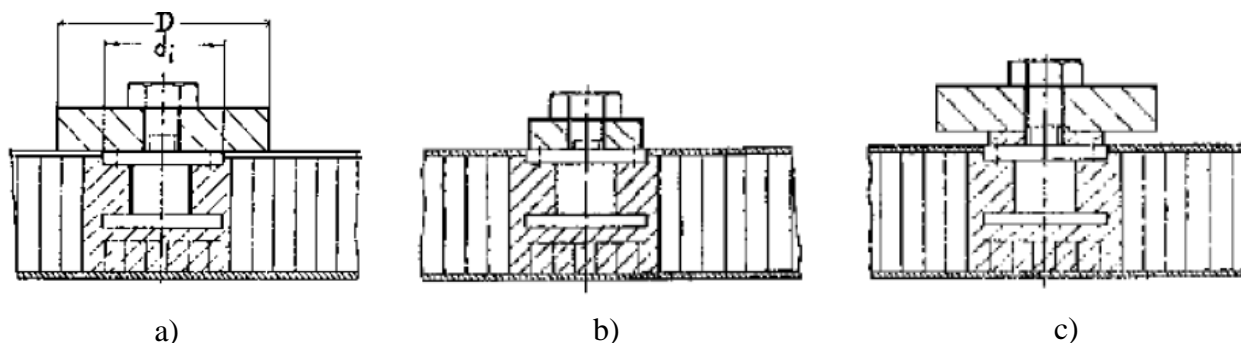
Tablica 10. Načini pucanja sendvič struktura

Popuštanje površine (engl. <i>face yielding/fracture</i>)	
Smicanje jezgre (engl. <i>core shear</i>)	
Smično savijanje (engl. <i>shear crimping</i>)	
Izvijanje (engl. <i>general buckling</i>)	
Naboravanje površine – lokalno izvijanje (engl. <i>face wrinkling – local buckling</i>)	
	
Ispupčivanje površine (engl. <i>intercell buckling</i>)	
Lokalno udubljenje (engl. <i>local indentation</i>)	

2.2.5. Smjernice za konstruiranje veza s umetcima

Smjernice za konstruiranje veza s umetcima, prema [22] glase:

- Tlačna opterećenja se prenose preko ljusaka sendviča u području ljepila. Prirubnica promjera D mora biti veća od najvećeg dosega ispune (Slika 24. a). Slika 24. b) prikazuje neispravno dimenzioniranje umetaka, ovdje je kontaktna površina manja od dodirne površine prirubnice. Slika 24. c) također predstavlja neispravan način dimenzioniranja gdje je metalna pločica manja od promjera ljepila.



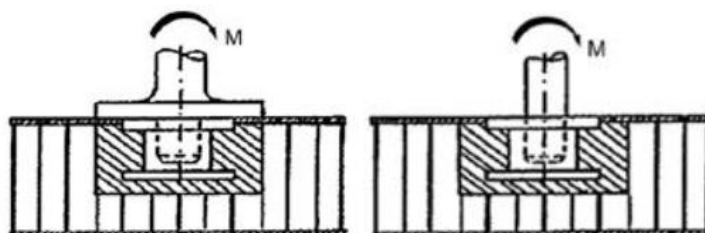
Slika 24. Smjernice za konstruiranje: a) ispravan postupak, b) i c) neispravan postupak

- Prirubnicu treba postaviti paralelno s ljuskom i onemogućiti joj pomak ispod ljuske sendviča pod djelovanjem opterećenja (Slika 25).



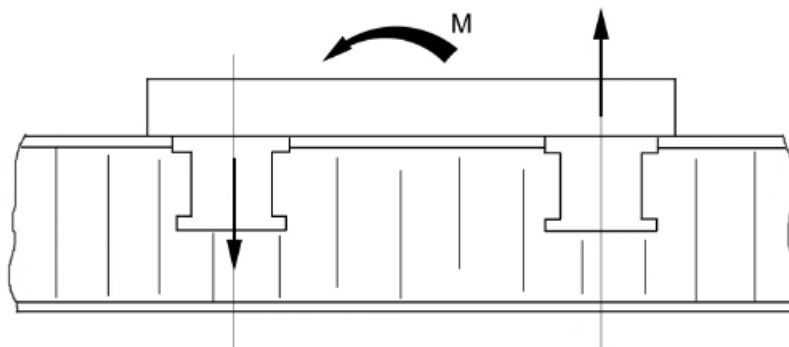
Slika 25. Umetci opterećeni vertikalnim silama

- Prijenos momenta na umetak treba izbjegavati (Slika 26).



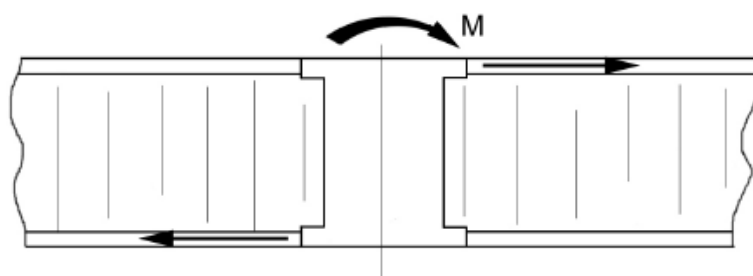
Slika 26. Konstrukcije opterećene momentima

- Ukoliko ih je nemoguće izbjeći, momenti se prenose preko parova umetaka koji su djelomično uronjeni u ljepilo prema slici 27.



Slika 27. Prijenos momenata preko umetaka koji su djelomično uronjeni u ljepilo

- Koncentrirani (lokalni) momenti se prenose preko prolaznih umetaka na ljudske sendviča (Slika 28).



Slika 28. Prijenos momenta preko prolaznog umetka

3. IZRADA SENDVIČ PANELA S UMETCIMA

3.1. Odabir materijala

Za potrebe testiranja u okviru ovog rada, izabrani su sljedeći materijali:

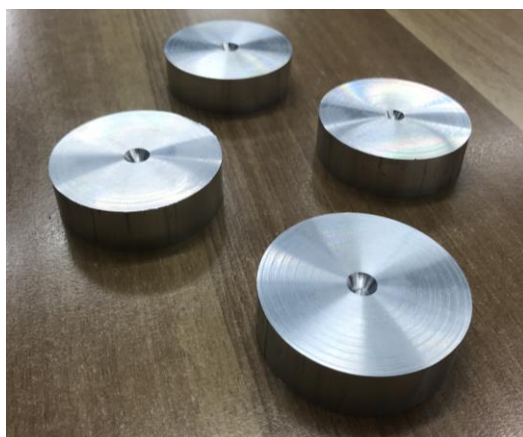
- Ispuna od aramidnih saća debljine 15 mm (Slika 29),
- Kora od ugljičnih vlakana dijagonalnog tkanja s usmjerenjem [Jezgra/90/45/90]_s i debljine 0,25 mm (Slika 30),
- Potpuno prolazni umetak od aluminija vanjskog promjera Ø50 mm i debljine 15 mm (Slika 31),
- Smola EC 157 proizvođača *Elan-Tech*® i otvrdnjivač W 152 MLR.
- Vijci M8 i M12 (8.8), matice i podložne pločice



Slika 29. Ispuna od aramidnih saća

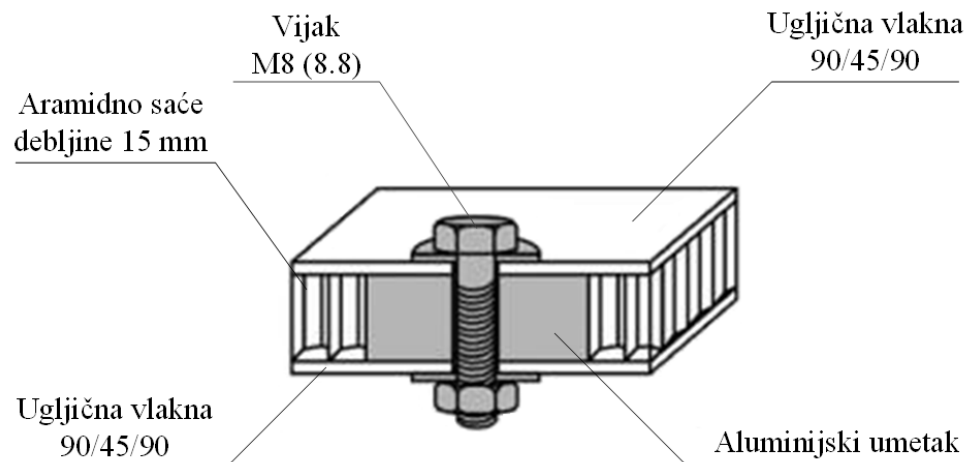


Slika 30. Ugljična vlakna tvrtke *TeXtreme*®



Slika 31. Aluminijski umetak

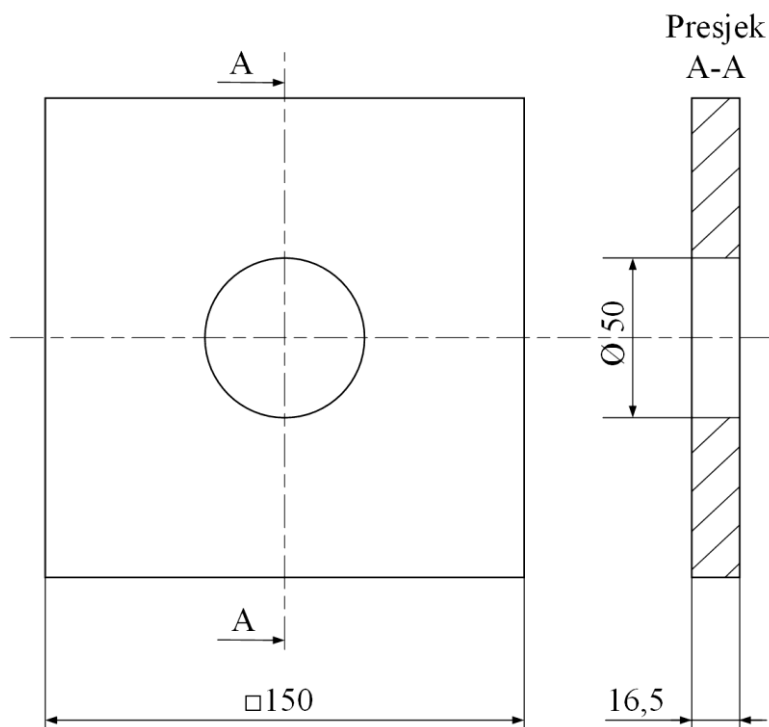
Na slici 32 je shematski prikaz presjeka odabrane sendvič strukture.



Slika 32. Shematski prikaz sendvič konstrukcije [24]

3.2. Dimenzije uzoraka

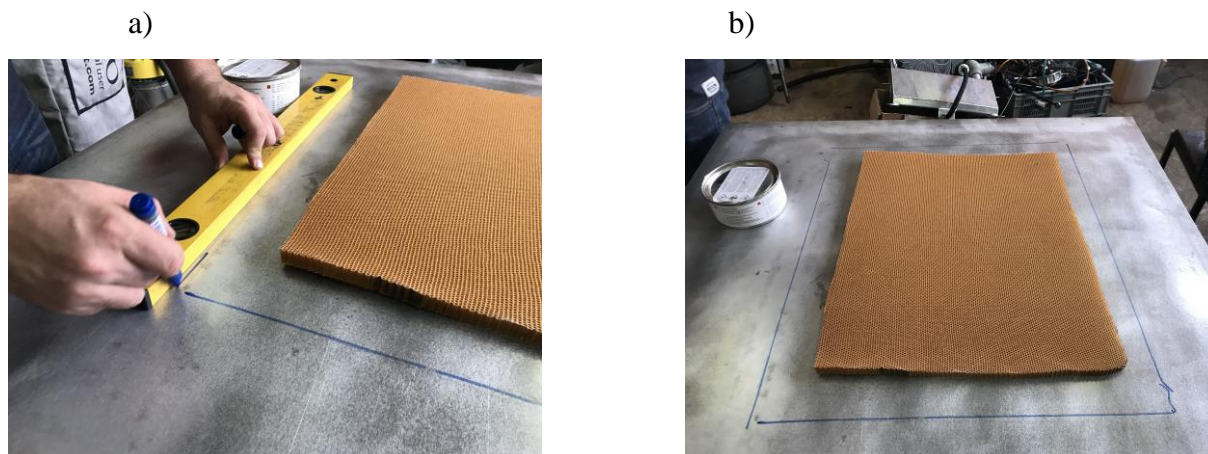
Dimenzije ispitnih uzoraka za testiranje iznose 150 x 150 x 16,5 mm, prema slici 33, a izrezat će se iz velike ploče sendvič konstrukcije.



Slika 33. Dimenzije uzorka izrezanog iz sendvič konstrukcije

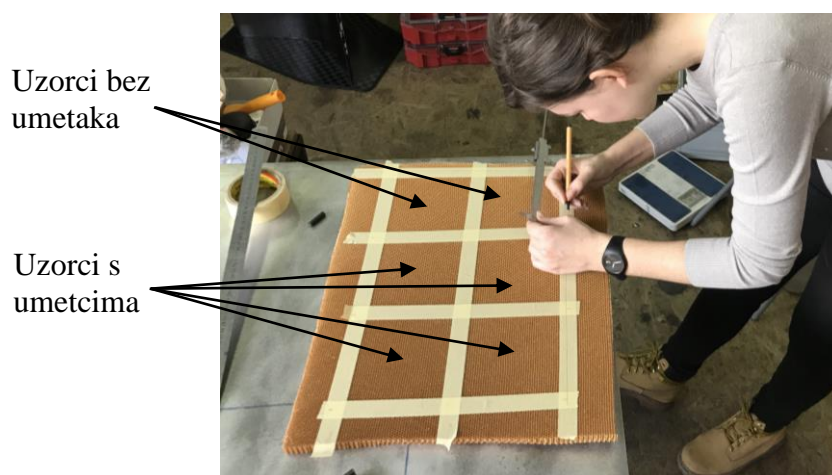
3.3. Izrada uzoraka

U ovom poglavlju prikazat će se postupak izrade testnih uzoraka. On započinje čišćenjem ravne radne površine za koju je odabran aluminijski lim. Moguće je korištenje i staklene površine, bitno je samo da je površina ravna i čista. Nakon što je površina očišćena acetonom, na nju se pozicionira aramidno saće i označuje se predviđena radna površina koja će se koristiti za laminiranje (Slika 34).



Slika 34. Priprema radne površine: a) označavanje, b) definirana radna površina

Za ispitivanje je predviđena izrada ukupno šest uzoraka sendviča, od kojih četiri imaju umetke, a dva su bez umetaka. Za sendvič konstrukciju bez aluminijskog umetka, saće će se ispuniti sa smolom i testirati bez umetka, od toga jedan uzorak pri tlačnom opterećenju, a drugi opterećenjem na savijanje. Od četiri uzorka s umetkom, dva će se ispitati pri tlačnom opterećenju, a dva uzorka opterećenjem na savijanje. Na slici 35 prikazana je izrada predviđenog rasporeda ispitnih uzoraka koji će se naknadno izrezati iz sendviča.

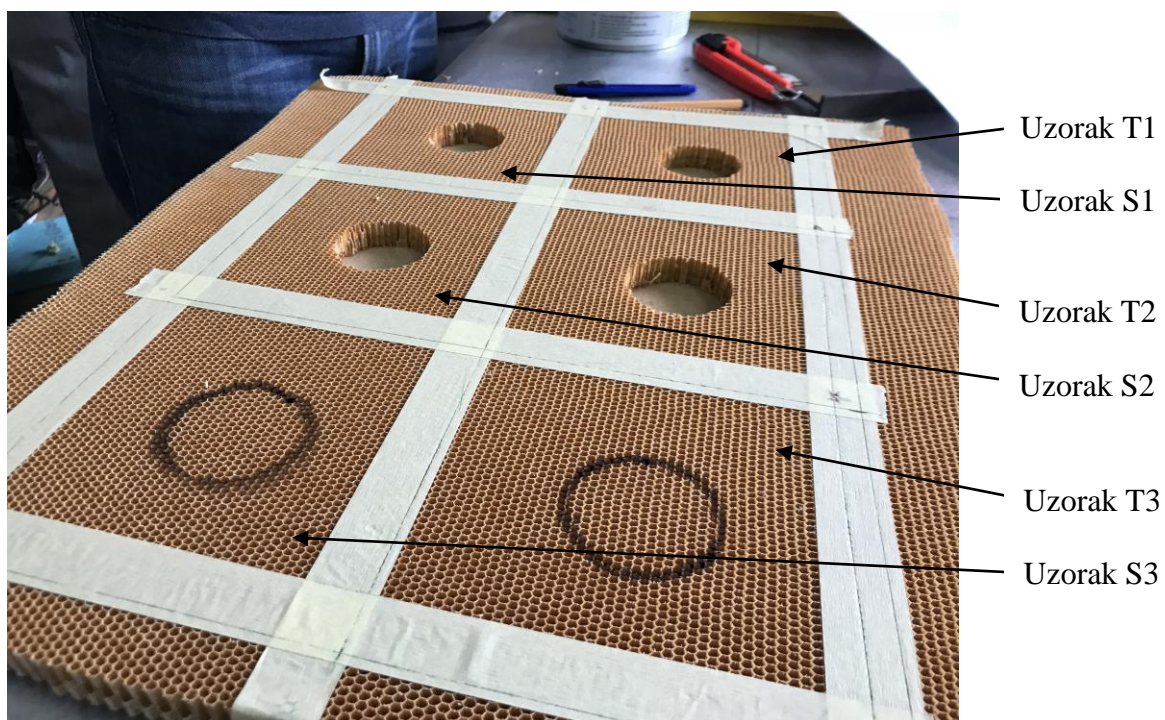


Slika 35. Raspored uzoraka u sendvič konstrukciji

Nakon definiranja dimenzija uzoraka, izrezani su provrti za umetke u aramidnom saću pomoću skalpela (Slika 36). Na slici 37 prikazano je aramidno saće sa definiranim uzorcima i provrtima za aluminijske umetke.

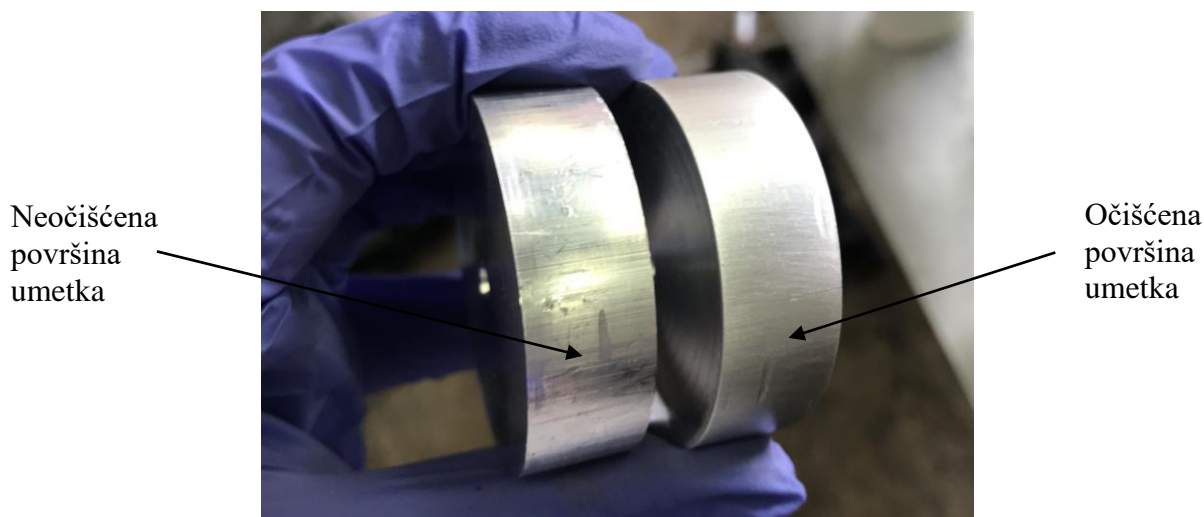


Slika 36. Izrezivanje provrta za umetke



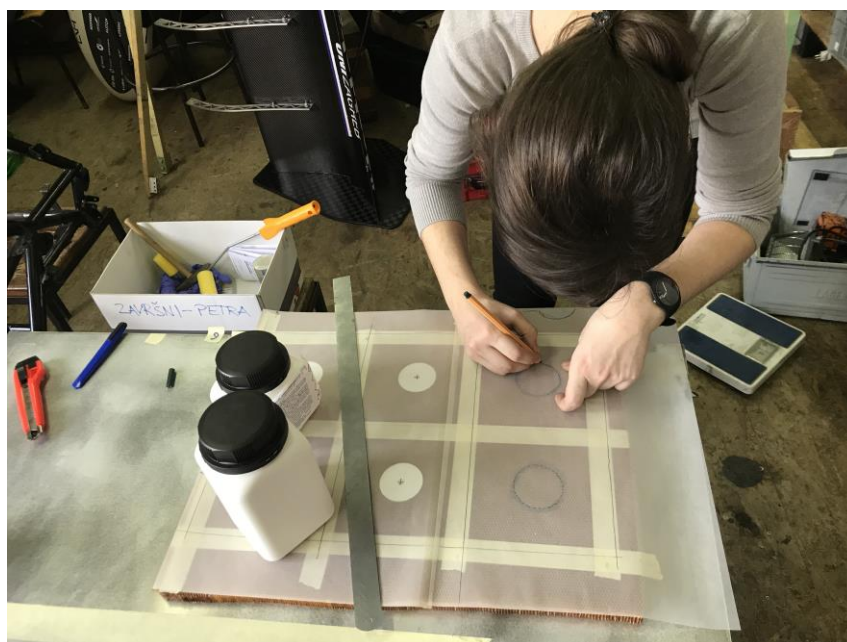
Slika 37. Aramidno saće s definiranim uzorcima, provrtima za umetke i ispunu sa smolom

Da bi se epoksidna smola što bolje zalijepila za bočne površine umetaka, potrebno ih je očistiti (pobrusiti) sa brusnim papirom. Na slici 38 prikazana je razlika između nepripremljene i pripremljene (očišćene) površine aluminijskog umetka.



Slika 38. Umetak prije i nakon brušenja

Za što preciznije izrezivanje ispitnih uzoraka nakon laminiranja, na paus papiru su označene pozicije provrta za umetke kod svih uzoraka (Slika 39).



Slika 39. Izrada predloška za rezanje ispitnih uzoraka i bušenje provrta za umetke

Na očišćenu radnu površinu nanosi se odjeljivač *Spacewax 300*, čija je funkcija sprječavanje lijepljenja sendviča za radnu površinu nakon procesa otvrdnjavanja smole. Krpicom se prvo nanese jedan tanki sloj po čitavoj označenoj površini, zatim se nakon 20 minuta čistom krpom obriše sloj dok se ne dobije glatka površina. Postupak se ponovi dva do tri puta. Nakon toga se na površinu još nanosi i tzv. *release agent*, koji također ima funkciju odvajanja sendviča od površine (Slika 40).



Slika 40. Nanošenje *release agent*-a na radnu površinu

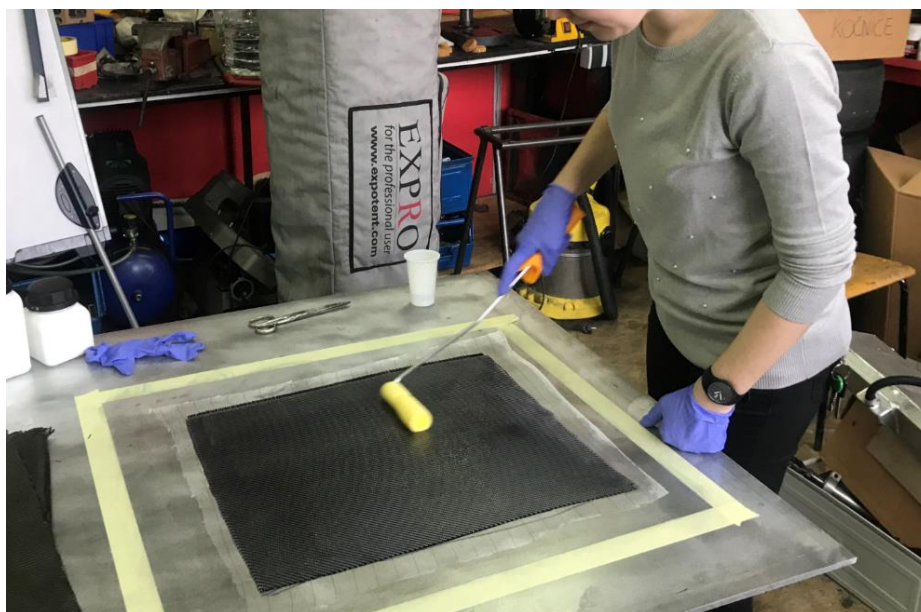
Nakon pripreme radne površine, slijedi laminiranje prvog sloja kore ugljičnih vlakana. Općenito kod rada s kompozitima važno je predvidjeti svaki korak u procesu proizvodnje, te unaprijed pripremiti sve potrebne materijale. Također je važno raditi unutar čistog prostora, uz često mijenjanje zaštitnih rukavica, brisanje radnog prostora od kapljica smole i sitnih ostataka od rezanja ugljičnih vlakana.

Sljedeći korak je priprema smole za laminiranje. Prema uputama proizvođača smola i otvrdnjivač (katalizator) se miješaju u omjeru 100:30 (Slika 41).

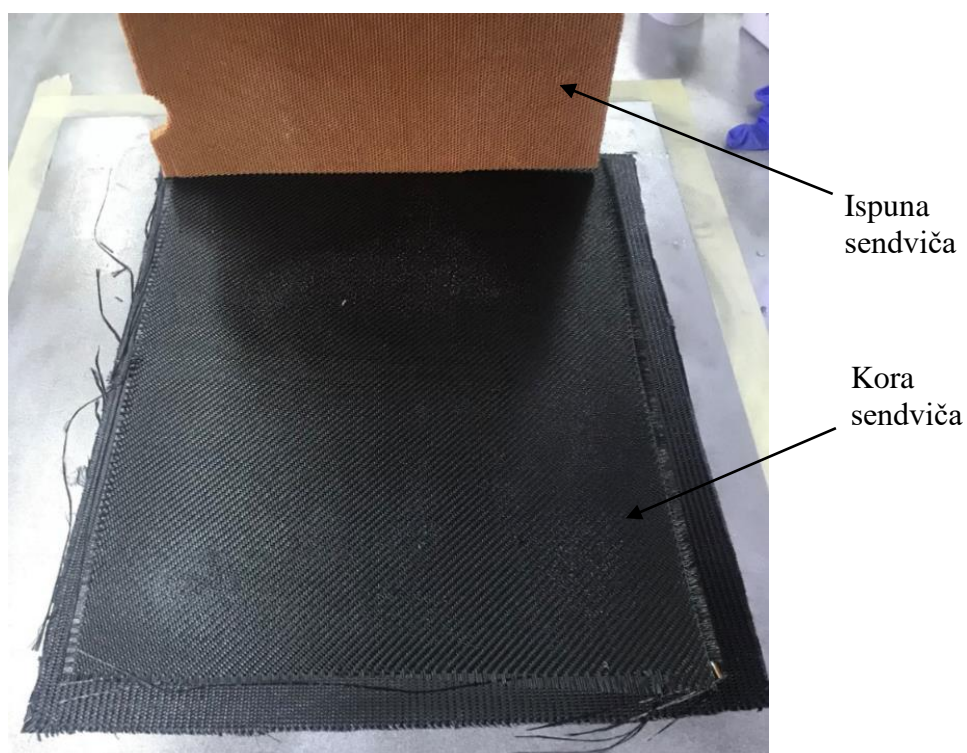


Slika 41. Miješanje smole i otvrdnjivača

Pripremljena smjesa nanosi se na ugljična vlakna. Prvo se laminira jedna kora sendviča (Slika 42) koja se odloži sa strane, a zatim se laminira druga kora, na koju se postavlja ispuna (Slika 43), umetci i na kraju prva laminirana kora ugljičnih vlakana.

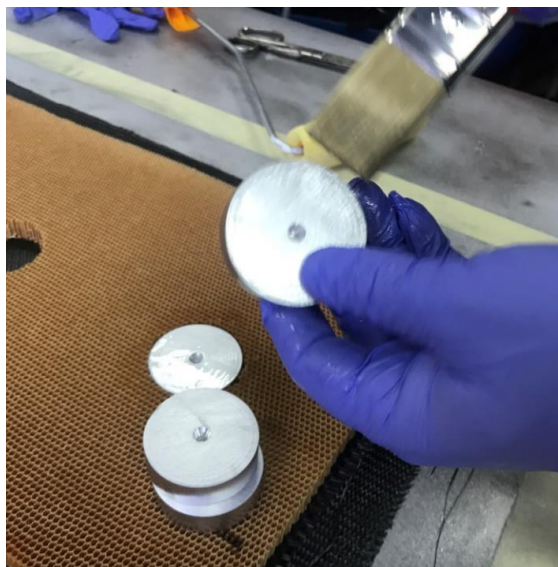


Slika 42. Laminiranje kore sendvič konstrukcije

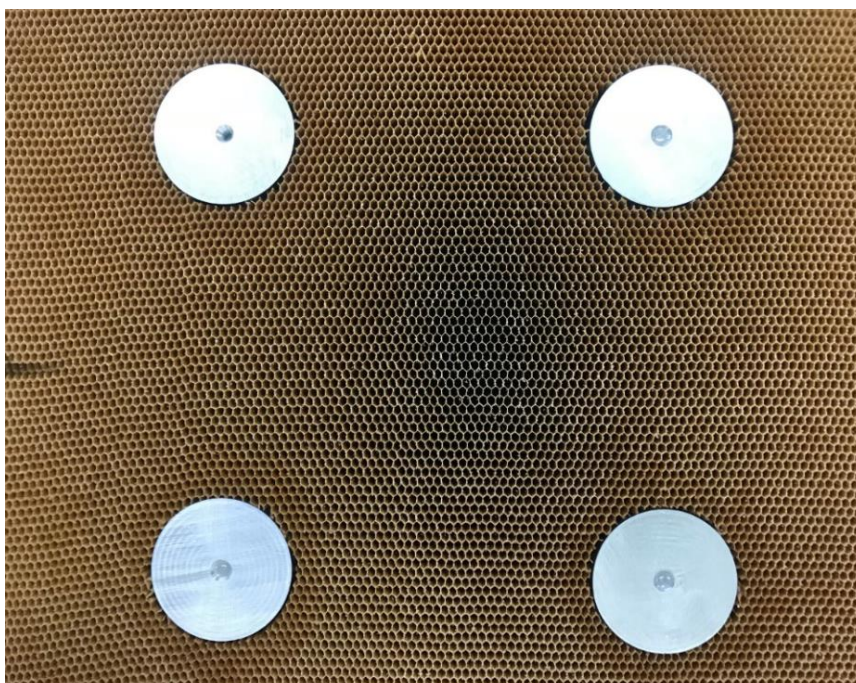


Slika 43. Postavljanje ispune na koru sendviča

Pobrušeni umetci se također kistom oblože smolom i postavljaju u provrte u saću (Slika 44). Nakon pozicioniranja, plastičnom špricom se još nanese dodatan sloj u saća koja su u dodiru s umetkom, te se sve još jednom dobro utrlja s kistom. Kada su umetci pozicionirani (Slika 45) slijedi priprema sendviča za podtlačno oblikovanje.



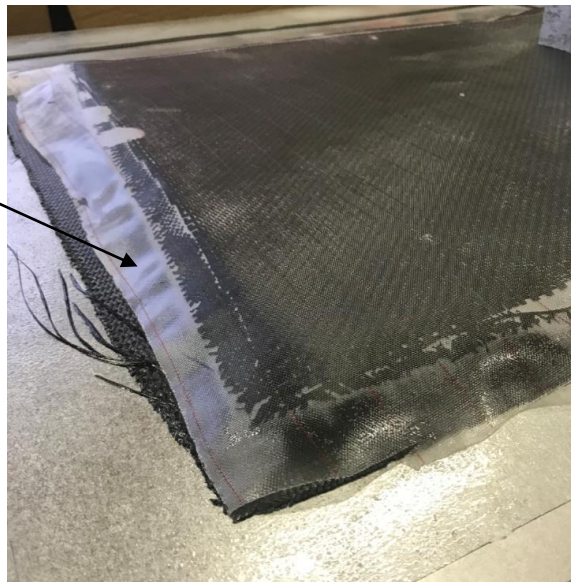
Slika 44. Nanošenje smole na umetke



Slika 45. Pozicionirani umetci unutar sendviča

Na ispunu sendviča se postavlja druga kora ugljičnih vlakana, te se laminat prekriva tkaninom za odjeljivanje (engl. *peel-ply*), (Slika 46), *release* filmom i *breatex* tkaninom koja upija višak smole (Slika 47).

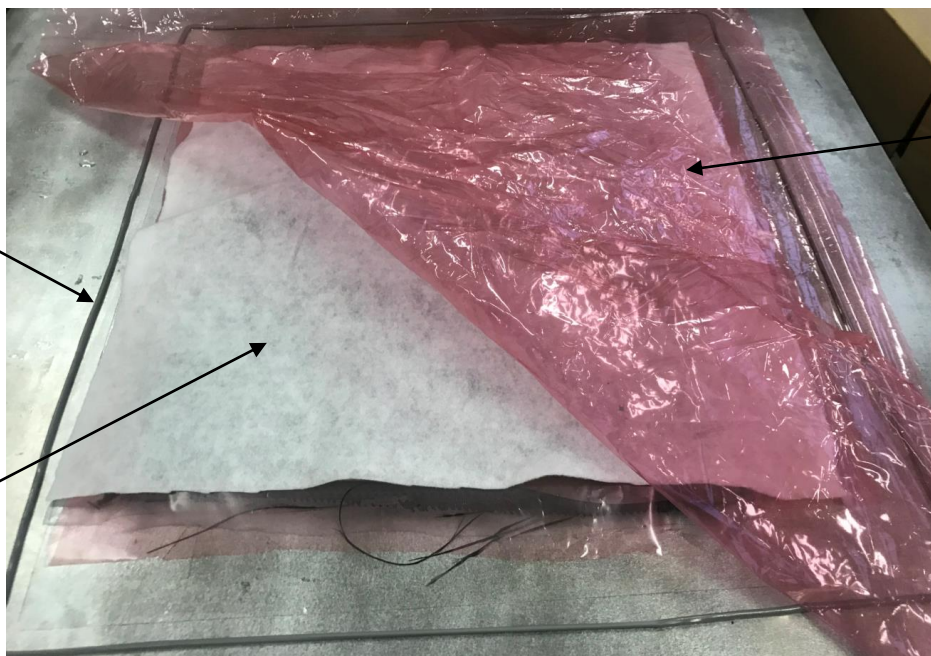
Traka za
odjeljivanje



Slika 46. Postavljanje tkanine za odjeljivanje

Zaptivna
traka

Breatex



Vakuumska
vreća

Slika 47. Postavljanje *breatex* tkanine

Crvena folija vidljiva na slici 47 je vakuumska vreća koja sve komponente sustava drži pod tlakom. Ona se na radnu površinu lijepi sa zaptivnom trakom koja je također vidljiva na slici 47.

Nakon postavljanja cijevi pumpe unutar sustava (Slika 48) i proces podtlačnog oblikovanja može početi. Nakon što se pumpa uključi, potrebno je provjeriti postoje li mjesta na kojima je vakuumska vreća probušena. Ako postoje, potrebno ih je zakrpati zaptivnom trakom.



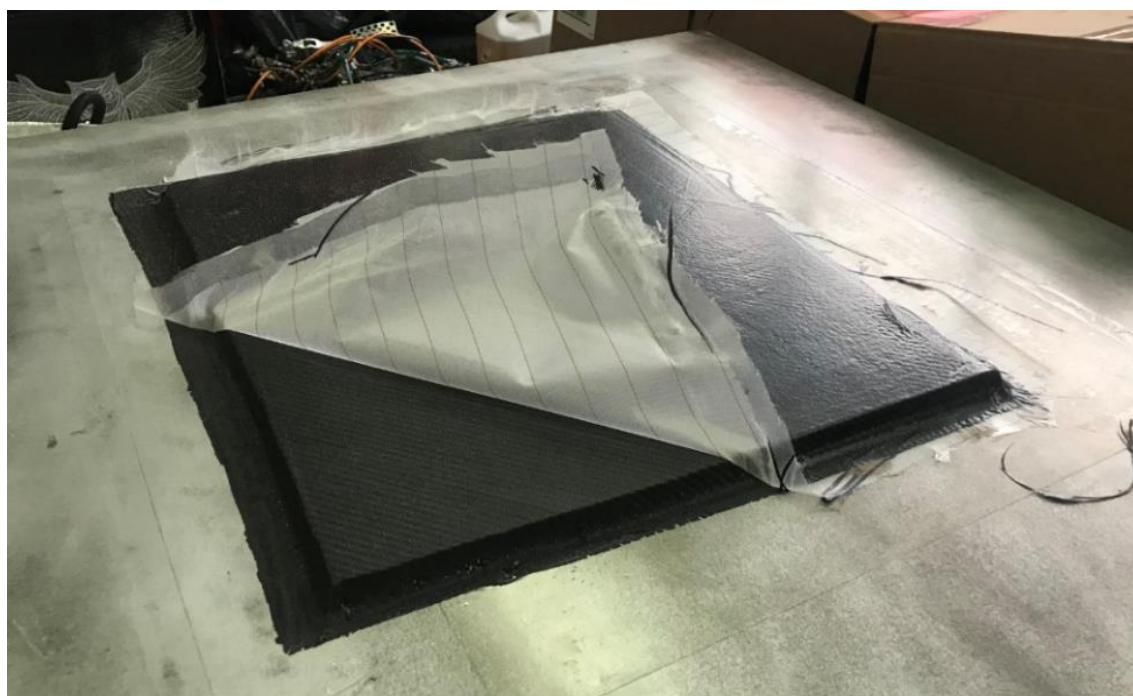
Slika 48. Postavljanje cjevčice podtlačne pumpe

Pumpa se ostavi uključena preko noći kako bi smola imala dovoljno vremena za očvršćivanje. Važno je napomenuti kako tijekom ovog procesa postoji mnogo parametara koji utječu na konačnu kvalitetu sendviča. Od čistoće prostora u kojem se obavlja proces laminiranja, okolne temperature, spretnosti laminiranja itd. Samim time što postoji mnogo proizvođača smola, ispuna, ugljičnih vlakana i preostalih komponenti ovog sustava, teško je reći koji od njih bi najbolje odgovarao za predstavljeni izbor sendvič konstrukcije. Čak i kod istog proizvođača smola, postoje različita vremena otvrdnjavanja koja imaju utjecaj na konačni proizvod. Tako je moguće dobiti znatno drugačija mehanička svojstva sendviča mjenjanjem samo jednog parametra – npr. duljine vremena laminiranja, odnosno trenutka paljenja podtlačne pumpe.

Nakon 18 sati pod tlakom, sendvič se vadi iz sustava (Slika 49), a preostali materijal (*peel-ply*, *breatex*, vakuumska vreća) se baca jer više nije upotrebljiv. Na slici 50 prikazan je sendvič s kojeg se skida *peel-ply* tkanina.



Slika 49. Sustav pod tlakom



Slika 50. Uklanjanje tkanine za odjeljivanje s gotovog sendviča

Na slikama 51. a) i b) vidljiva je razlika u strukturi površine sendviča između strane koja je bila naslonjena na aluminijsku radnu površinu i površine sendviča koja je s gornje strane bila presvučena *peel-ply* tkaninom. Na slikama 51. c) i d) uvećano su prikazane obje površine. Vidljivo je da je površina na slici 51. a) znatno grublja od one prikazane na slici 51. b). Takva je pojava uobičajena u ovakvom postupku, a kao takva ne narušava svojstva kompozita. Ona se može izgladiti finim brušenjem, ukoliko postoje estetski zahtjevi za sendvič konstrukciju.

a)



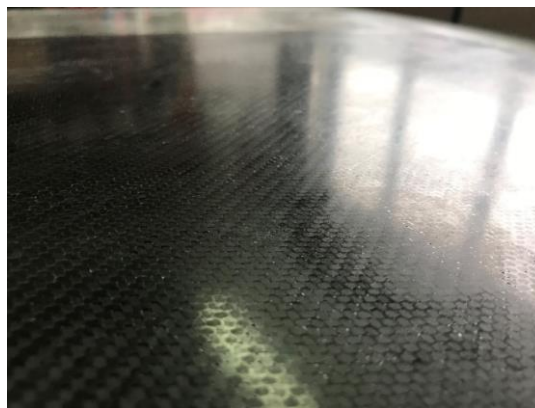
b)



c)



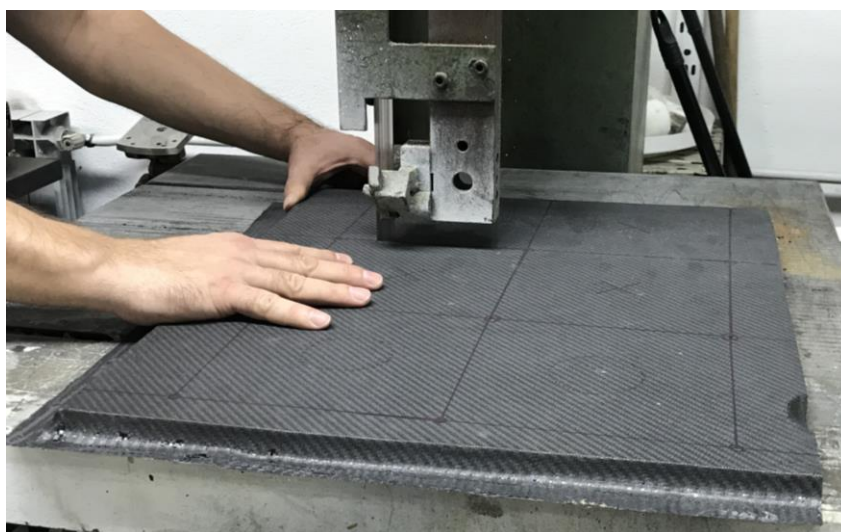
d)



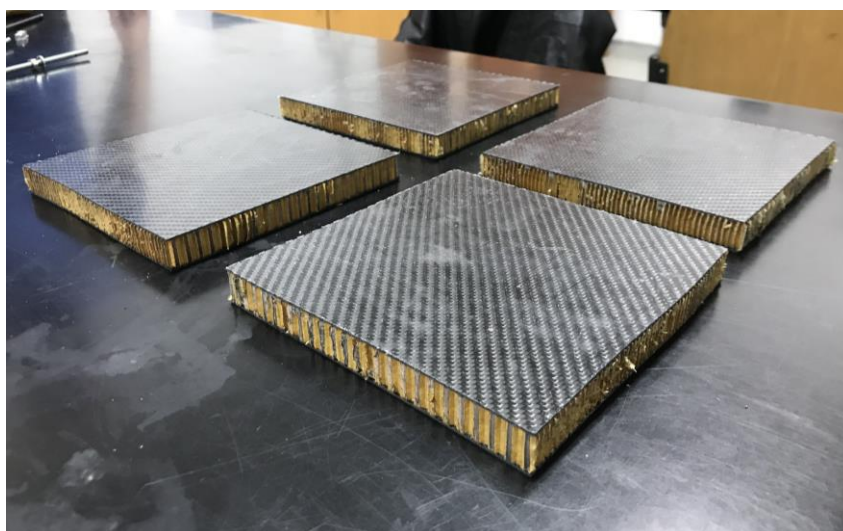
Slika 51. Površina sendvič panela: a) strana koja je bila okrenuta peel-ply tkanini, b) strana koja je bila okrenuta prema stolu, c) detaljniji prikaz slike a) i d) detaljniji prikaz slike b)

3.4. Priprema uzoraka za testiranje

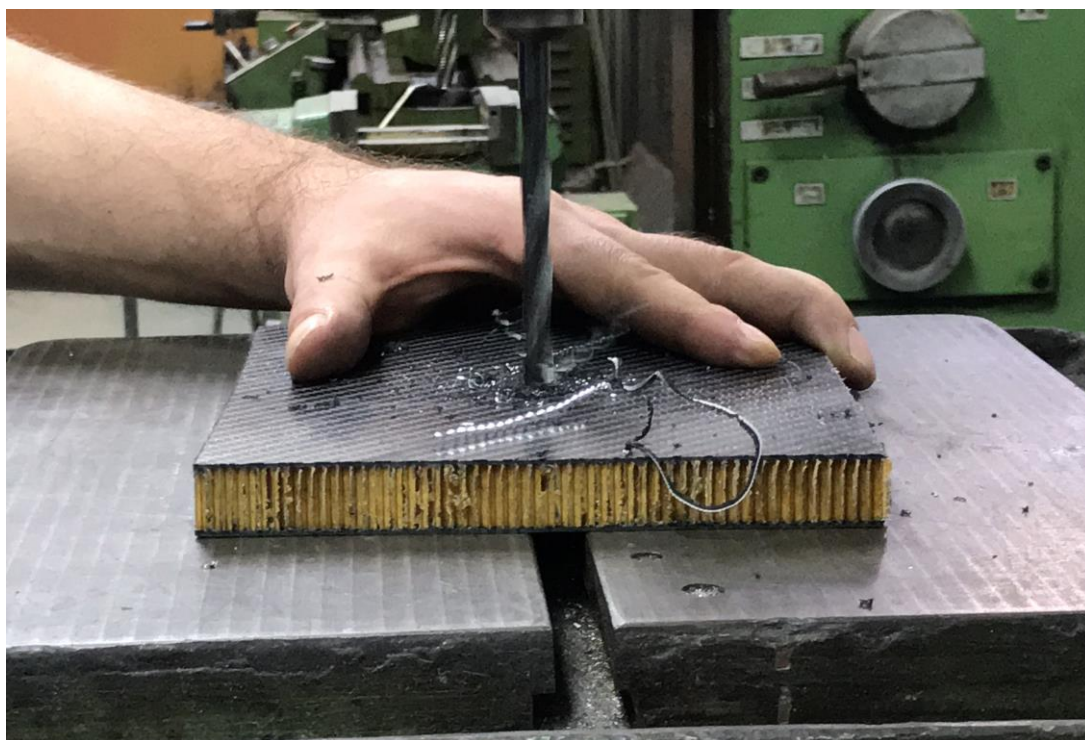
Nakon što je veliki sendvič panel izvađen iz sustava prikazanog na slici 52, potrebno je izrezati unaprijed definirane uzorke pomoću već nacrtanog predloška za rezanje i bušenje provrta (Slika 39). Uzorci su izrezani na tračnoj pili (Slika 52), a nakon što su izrezani (Slika 53), na sendvičima su probušeni provrti za vijke (Slika 54). Provrti se buše za vijak M8 (za tlačno opterećenje) i M12 (za opterećenje na savijanje), te se nakon bušenja u sendvič postavljaju vijak, podložne pločice i matica (Slika 55).



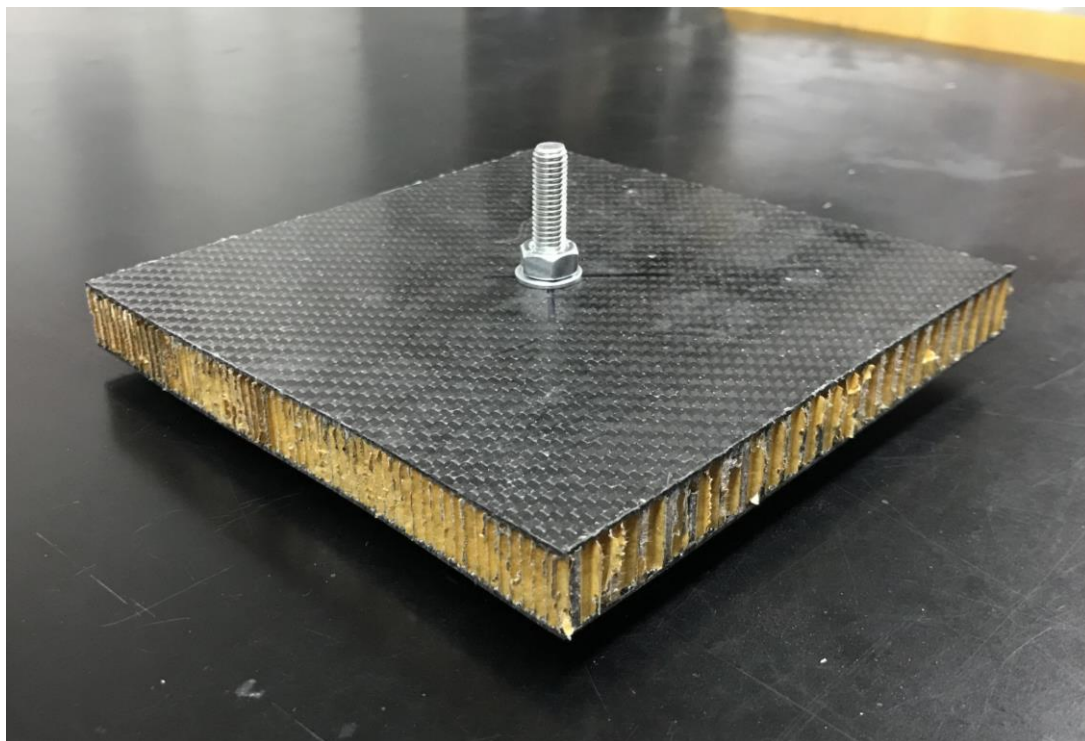
Slika 52. Izrezivanje uzoraka iz sendvič panela



Slika 53. Izrezani sendvič paneli

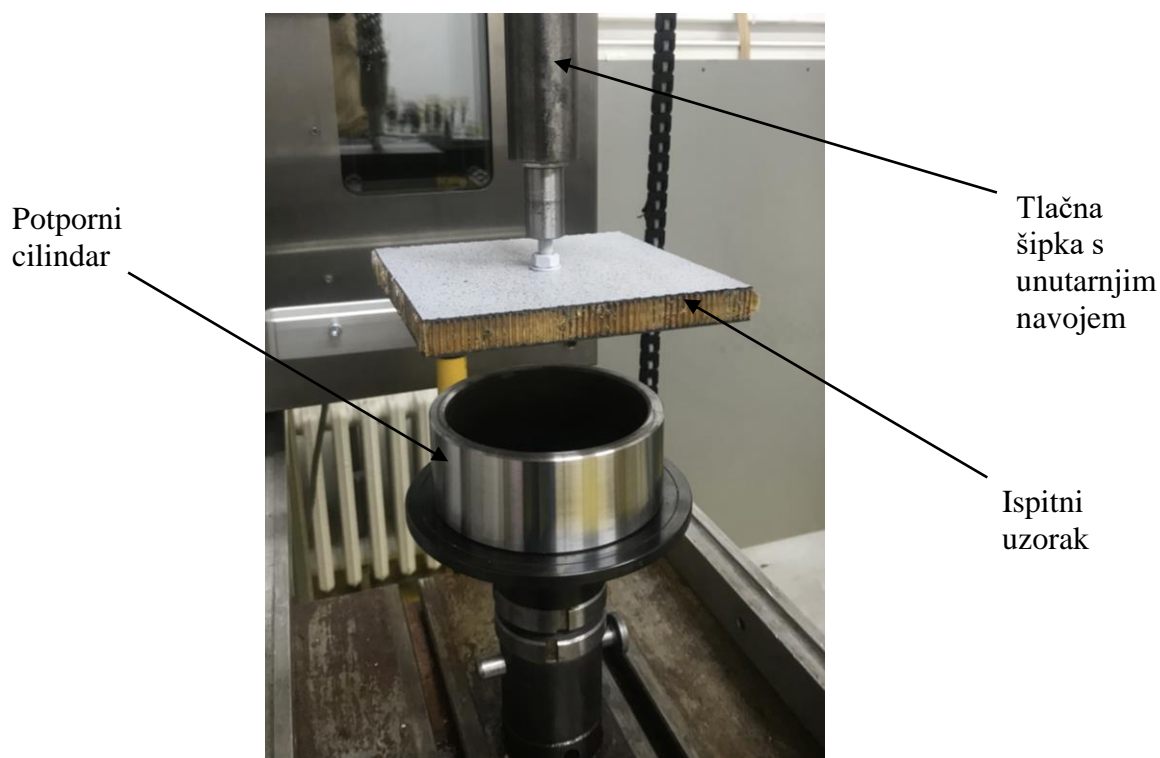


Slika 54. Bušenje provrta u sendvič panelima



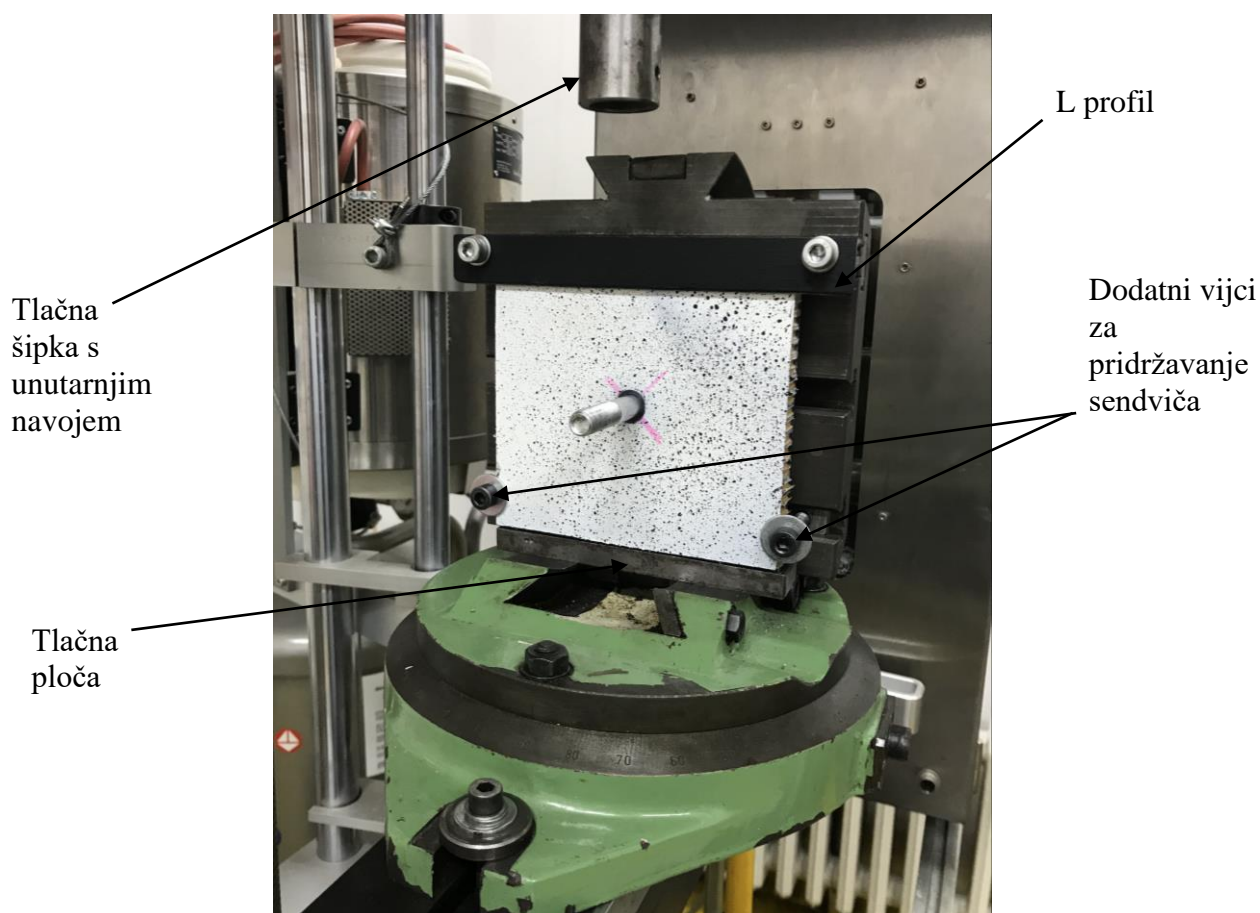
Slika 55. Sklop sendviča s umetkom i vijkom

Budući da je za testiranje predviđeno opterećenje umetka s tlačnim opterećenjem i opterećenjem na savijanje, potrebno je pripremiti i odgovarajući prihvat za statičku kidalicu *Messphysik Beta 50-5* koji će fiksirati sklop umetka i sendviča u oba slučaja. Tako je za slučaj tlačnog opterećenja odabrana tlačna šipka s unutarnjim navojem koja se prihvaća na vijak M8 u umetku, dok je za potporanj sendviča odabran jednostavan čelični cilindar (Slika 56), kako se za vrijeme opterećivanja vijak ne bi nigdje oslanjao.



Slika 56. Sustav tlačnog opterećenja sendviča

Kod opterećenja na savijanje uzorak je pričvršćen za vertikalno postavljenu tlačnu ploču s čeličnim L-profilom te s dva dodatna vijka s podložnim pločicama sa svake strane sendviča (Slika 57). Između tlačne ploče i sendviča nalazi se čelična ploča s provrtom (Slika 58) kako glava vijka ne bi sprječavala ravnomjerno nalijeganje sendviča na podlogu. Sila je narinuta preko šipke s unutarnjim navojem, a krak na kojem se ostvaruje moment iznosi 14 mm. Na dijelu vijka M12 gdje je djelovala sila nije bilo navoja, kako bi se izbjeglo zarezno djelovanje.

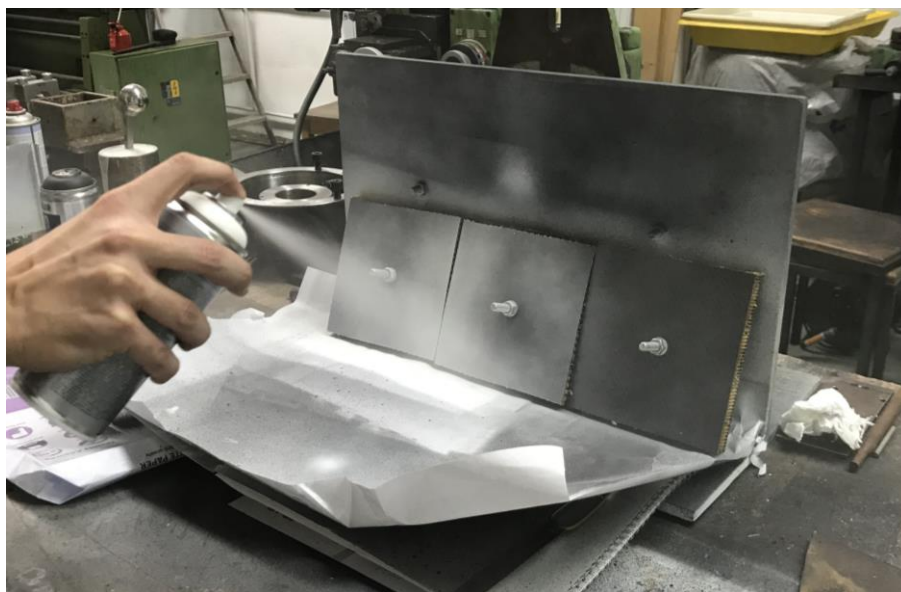


Slika 57. Sustav opterećivanja sendviča na savijanje



Slika 58. Čelična ploča s provrtom za glavu vijka

Posljednji korak prije samog testiranja je nanošenje boje na ispitni uzorak kako bi se pomoću mjernog sustava *Aramis* objašnjenog u sljedećem poglavlju moglo odrediti polje pomaka i deformacija na mjestu spoja umetka i kompozitne strukture. Na uzorke se prvo nanese sloj bijele mat boje (Slika 59), a zatim se nanese crni sloj u prolazima kako bi se na površini uzorka dobile crne točkice (Slika 60).

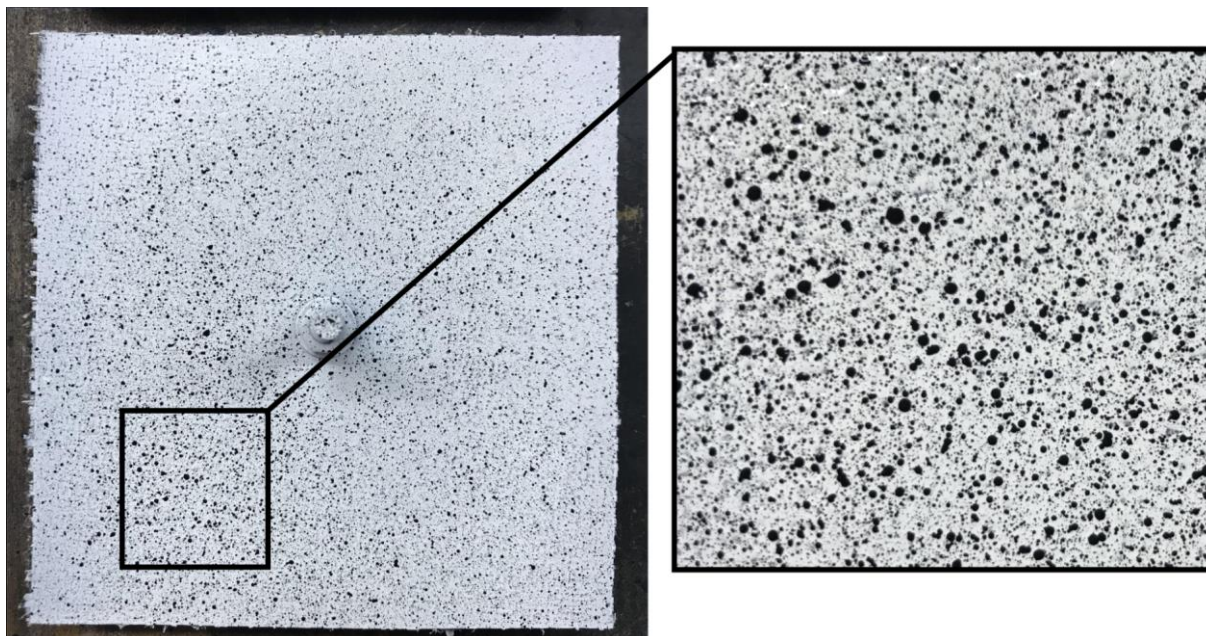


Slika 59. Nanošenje bijele mat boje na ispitne uzorke

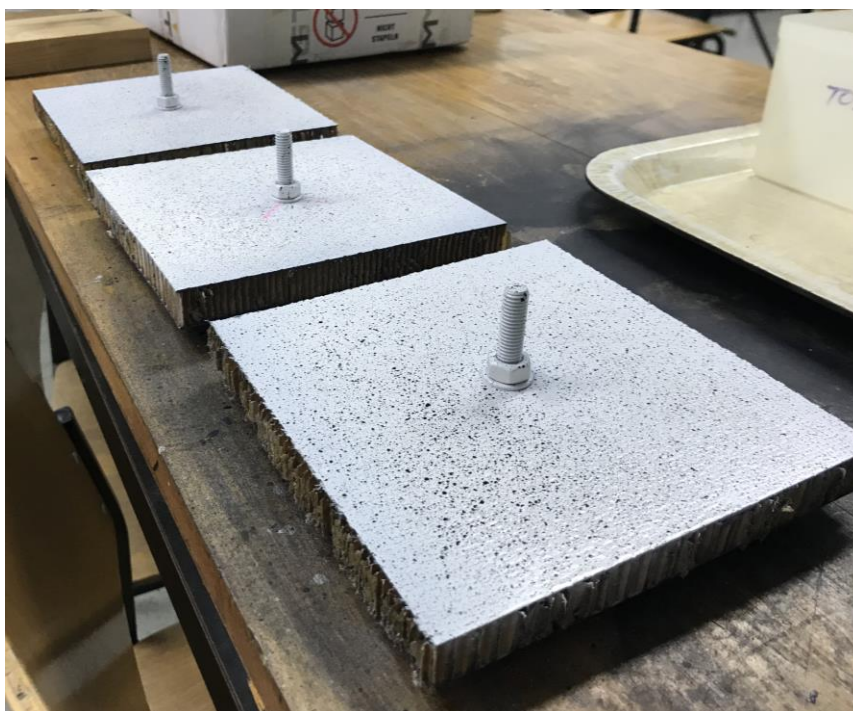


Slika 60. Nanošenje uzorka crnih točkica na ispitne uzorke

Kada se dobije površina zadovoljavajuće gustoće i rasporeda crnih točkica (Slika 61), gotove uzorke je potrebno odložiti na sušenje (Slika 62).



Slika 61. Prikladna tekstura na površini uzorka za mjerenje optičkim sustavom *Aramis*



Slika 62. Sušenje uzoraka

4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

4.1. Optički mjerni sustav *Aramis*

Aramis je beskontaktni optički mjerni sustav (Slika 63), koji analizira, izračunava i dokumentira pomake i deformacije na površini ispitnih uzoraka [25]. Služi za mjerenja trodimenzionalne promjene oblika i raspodjele polja pomaka i deformacija na površini statički ili dinamički opterećenih. Primjenjuje se u analizi čvrstoće konstrukcija, svojstava materijala, verifikaciji i usavršavanju numeričkih proračuna, itd. Prikladan je za analizu objekata iz metalnih, kompozitnih, gumenih, drvenih i drugih materijala.



Slika 63. Optički mjerni sustav *Aramis*

Za statički i dinamički opterećene objekte kao rezultate mjerenja iskazuje

- 3D površinske koordinate,
- 3D pomake i brzine,
- brzinu prirasta i deformacije,
- tenzor površinskih deformacija.

Za razliku od tenzometra ili ekstenzometra koji daju samo pojedinačne mjerne vrijednosti, *Aramis* određuje raspodjelu pomaka i deformacija po cijelom analiziranom području, što omogućuje bolje razumijevanje ponašanja materijala i konstrukcija.

Grafički prikaz mjernih rezultata nudi uvid u mehaničko ponašanje mjernog objekta. Sustav snima niz digitalnih slika koje kasnije diskretizira manjim podskupinama piksela koje se nazivaju fasetama. Svaka faseta predstavlja jednu mjernu točku. Prva slika u procesu mjerenja predstavlja nedeformirano stanje objekta, dok ostale snimljene slike predstavljaju redom novo definirano stanje. *Aramis* uspoređuje digitalne slike i izračunava pomake i deformacije definiranih mjernih točaka (faseta) mjernog objekta.

Ako mjerni objekt ima siromašnu površinsku teksturu, kao što je slučaj kod homogene površine, onda se takva površina treba posebno pripremiti za mjerenje. Priprema površine svodi se na nanošenje stohastičkog rastera, kao što je prikazano u prethodnom poglavlju na slici 61.

4.1.1. Postupak mjerenja optičkim sustavom *Aramis*

Postupak mjerenja sastoji se od sljedećih koraka

- definiranje mjernog volumena,
- priprema mjernog objekta,
- kalibracija mjernog sustava za odabrani mjerni volumen,
- definiranje brzine snimanja,
- snimanje uzoraka tijekom ispitivanja,
- definiranje zone interesa i veličina faseta,
- obrada digitalnih slika u programu sustava,
- odabir prikaza rezultata,
- transformacija projekta u definirani koordinatni sustav,
- dokumentacija rezultata.

4.1.2. Priprema mjernog objekta i optičkog mjernog sustava Aramis

Prije početka ispitivanja važno je napraviti sve faze pripreme mjernog objekta i samog optičkog sustava. Priprema mjernog objekta važan je dio provedbe mjerenja. Neadekvatna površina mjernog objekta i problem s rasterom mogu znatno utjecati na rezultat mjerenja, stoga je neophodno da su ispunjeni sljedeći preduvjeti

- na površinu mjernog objekta mora se nanijeti stohastički uzorak prepoznatljiv senzoru kako bi se snimljene slike mogle pravilno diskretizirati fasetama,
- nanesen uzorak mora biti tanak i mora dobro prianjati uz površinu mjernog objekta kako bi mogao pratiti deformacije uzorka,
- površina uzorka mora biti glatka jer jako strukturirana površina može uzrokovati probleme u identifikaciji faseta,
- tekstura na površini objekta mora biti kontrastna,
- površina uzorka ne smije biti sjajna zbog pojave refleksija koja uzrokuje loš kontrast i svjetlinu u desnoj i lijevoj kameri.

Prije početka ispitivanja potrebno je podesiti parametre kao što su udaljenost od objekta i osvjetljenje objekta te je potrebno provesti kalibraciju sustava. Kalibracija služi kako bi se podesili unutarnji i vanjski parametri kamera, te se poništile sve nepravilnosti u kamerama koje mogu biti uzrokovane okolinom u kojoj se provodi mjerenje. Nepravilnosti mogu biti neprikladan prostor ispitivanja (zadimljen ili prašnjav prostor) ili nepravilnosti na samim kamerama (nečiste leće ili polarizacijska stakla, ili različita oštećenja na lećama).

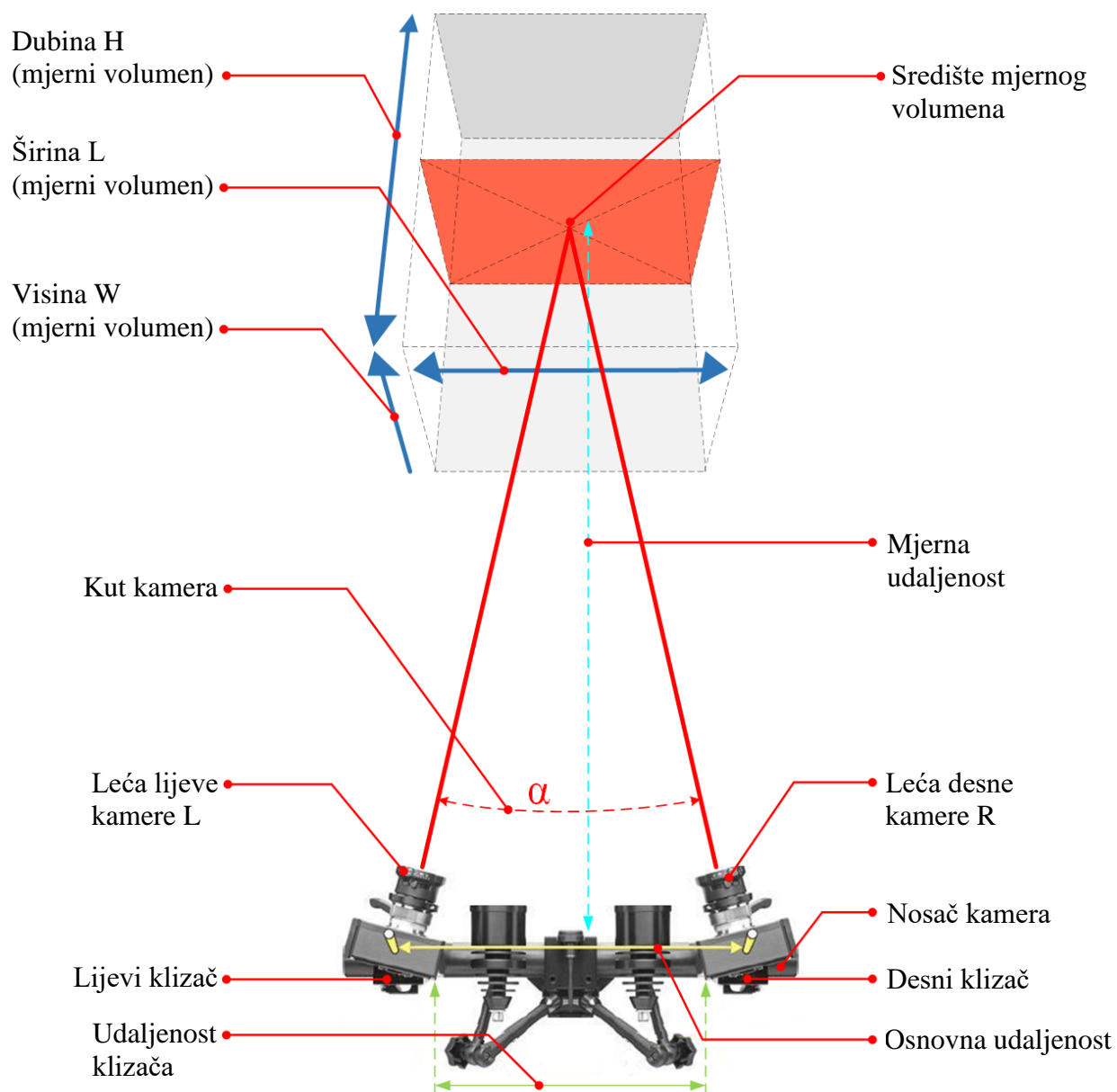
4.1.3. Kalibracija sustava

Proces kalibracije se provodi postupkom koji je unaprijed određen u softveru sustava, tako da se s unaprijed određenim parametrima sustava snima kalibracijski objekt. Na taj način se jednom pikselu na slici koju kamera snima dodjeljuje stvarna mjerna jedinica milimetar (Slika 64).



Slika 64. Kalibriranje optičkog sustava *Aramis*

Parametri koje je potrebno definirati prije svakog mjerenja su mjerni volumen na osnovu kojeg se definira razmak i kut između kamera, otvor blende s kojim se korigira razina osvijetljenosti objekta i fokus kamera koji podešava oštrinu slike. Sve parametre treba podesiti prema uputama proizvođača, a oni ovise o odabranom mjernom volumenu (Slika 65).

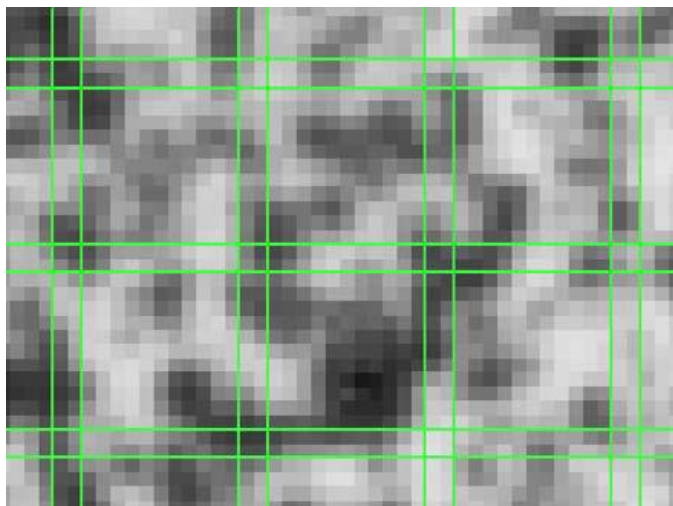


Slika 65. Parametri sustava Aramis koji se podešavaju za odabrani mjerni volumen

Kada se sustav jednom kalibrira za određeni mjerni volumen, podaci o kalibraciji pohranjuju se u memoriji te kalibraciju više nije potrebno ponavljati. Tako kalibriran sustav moguće je premještati na lokaciju gdje želimo provedbe mjerenja, ali uz oprez da se međusobni položaj postavljenih kamera ne bi poremetio.

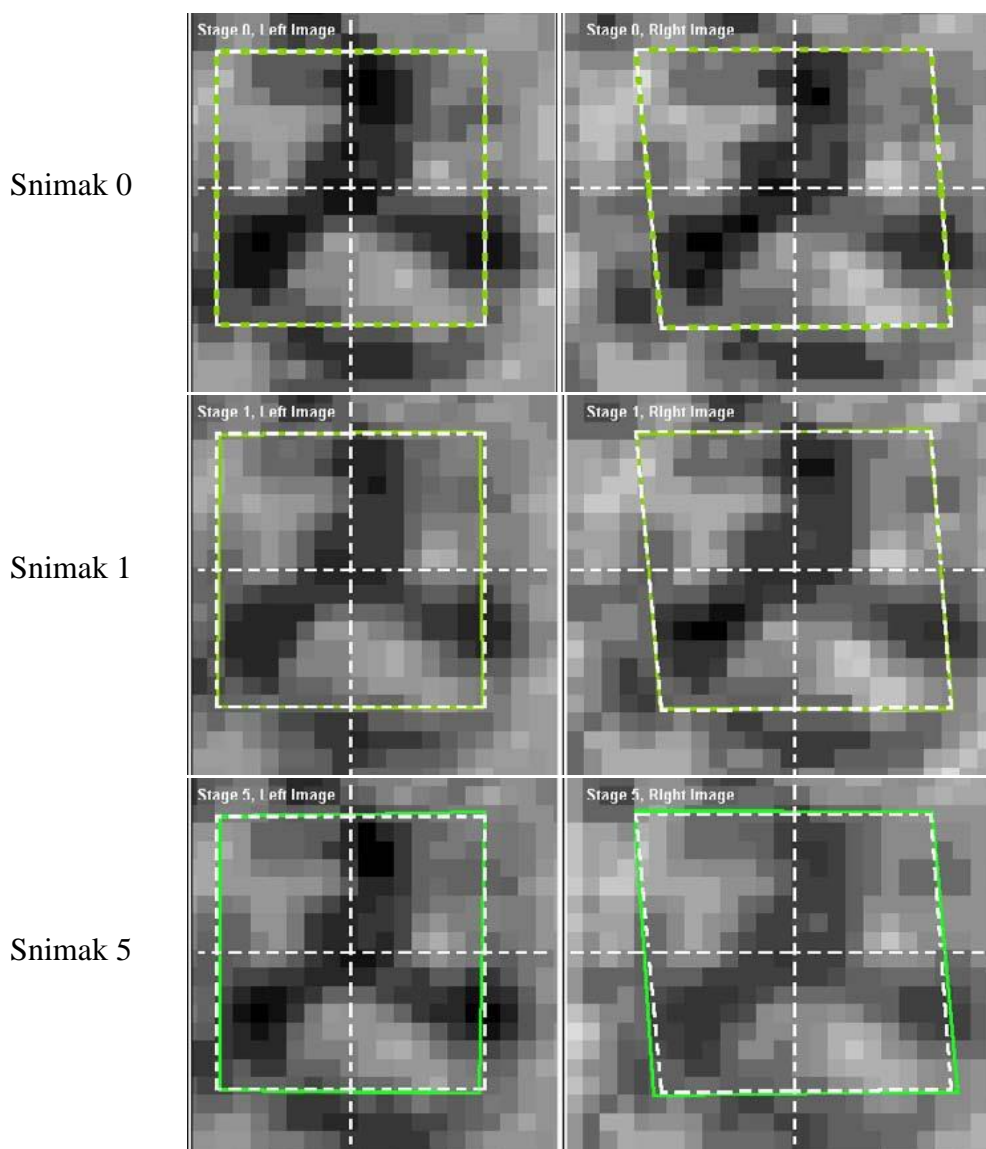
4.1.4. Veličina i oblik fasete

Softverski zadana veličina fasete dobar je kompromis između mjerne rezolucije i mjernog šuma. Manje fasete u pravilu daju veći broj mjernih podataka, ali isto tako postoji granica minimalne veličine fasete ispod koje je mjerni šum neprihvatljiv. Veličinu faseta potrebno je prilagoditi površini uzorka tako da se stohastička struktura može jasno očitati unutar nje. Prikazana faseta (slika 66) je veličine 15 x 15 piksela s dva piksela koja se preklapaju u nultom koraku (neopterećenom stanju).



Slika 66. Faseta veličine 15 x 15 piksela, s dva preklapajuća piksela

Na slici 67 prikazan je primjer faseta kroz snimke 0-5 od desne i lijeve kamere. Promatrane vrijednosti su označene kroz 6 stupnjeva deformacije, a to su koraci od 0 do 5. Korak 0 predstavlja referentno nedeformirano stanje, a korak 5 predstavlja konačno deformirano stanje.



Slika 67. Prikaz faseta snimaka od 0 do 5

2D koordinate faseta sustav određuje iz kutnih točaka i središta zelene fasete. Korištenjem metode fotogrametrije, 2D koordinate iste fasete se promatraju iz lijeve i desne kamere, a rezultat je zajednička 3D koordinata. Nakon računanja rezultat je dostupan kao 3D prikaz iz kojeg se mogu napraviti svi daljnji prikazi potrebnih podataka.

4.2. Testiranje uzoraka tlačnim opterećenjem

Cilj ovog testiranja je određivanje kritičnog tlačnog opterećenja koje dovodi do narušavanja integriteta kompozitne konstrukcije. Tri sendviča su podvrgnuta testiranju, od kojih uzorci T1 i T2 u sebi sadrže aluminijski umetak, a T3 sadrži smolom popunjena saća po cijelom volumenu unutar kružnice Ø50 mm, gledano od centra vijka. Kompozitna konstrukcija prihvaćena na statičkoj kidalici i mjernim sustavom *Aramis* prikazana je na slici 68, a svi podešeni parametri mjernog sustava *Aramis* prikazani su u tablici 11. Brzina opterećivanja statičke kidalice iznosila je 3,5 mm/min, a veličina fasete kod *Aramisa* je podešena na 25 x 20 piksela, sa pet preklapajućih piksela.

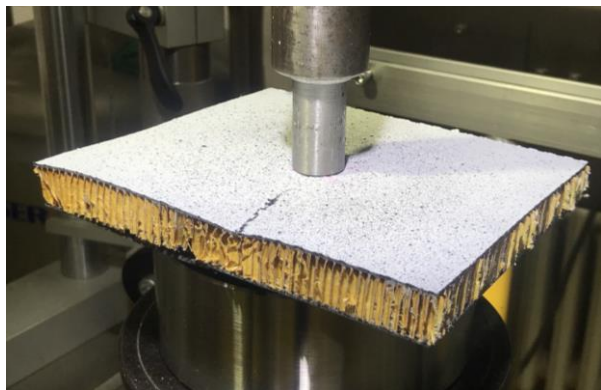


Slika 68. Eksperimentalni postav za ispitivanje uzoraka pri tlačnom opterećenju

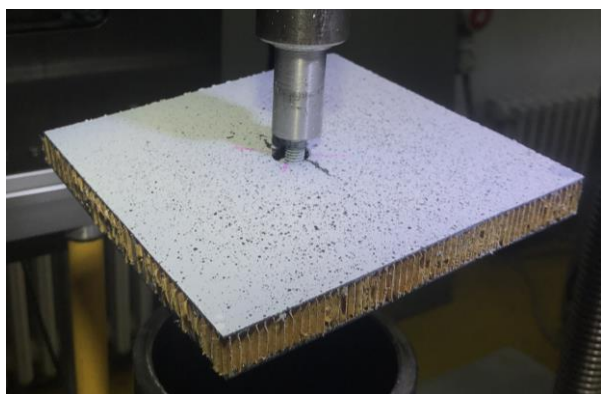
Tablica 11. Parametri kalibracijskog objekta

Kalibracijski objekt		Ploča (kodirana)
Tip objekta		CP20/MV90x72
Kalibracijska skala	Udaljenost 1:	83.000 mm
	Udaljenost 2:	83.000 mm
Promjer leća kamera		50.00 mm
Devijacija kalibracije		0.022 piksela
Kut mjerenja		-26.7°
Visina mjerenja		62 mm
Mjerni volumen		135 / 100 / 80 mm

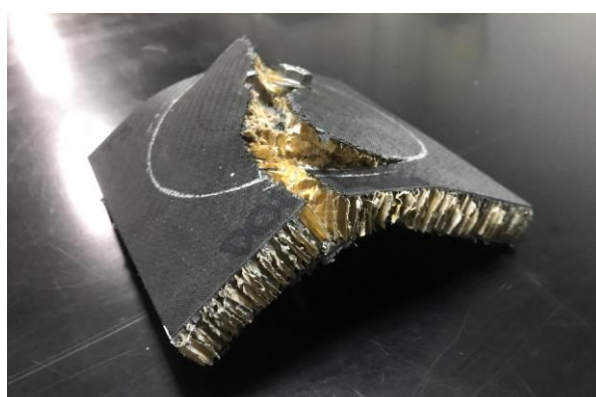
Na slici 69. a) prikazana je gornja strana uzorka T1 nakon potpunog prodiranja vijka u kompozitnu sendvič konstrukciju, a na slici 69. b) donja strana. Na slici 70. a) i b) su prikazani isti pogledi sendvič konstrukcije kod uzorka T2, a na slici 71. a) i b) je prikazan uzorak T3 bez aluminijskog umetka.



Slika 69. Uzorak T1 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka



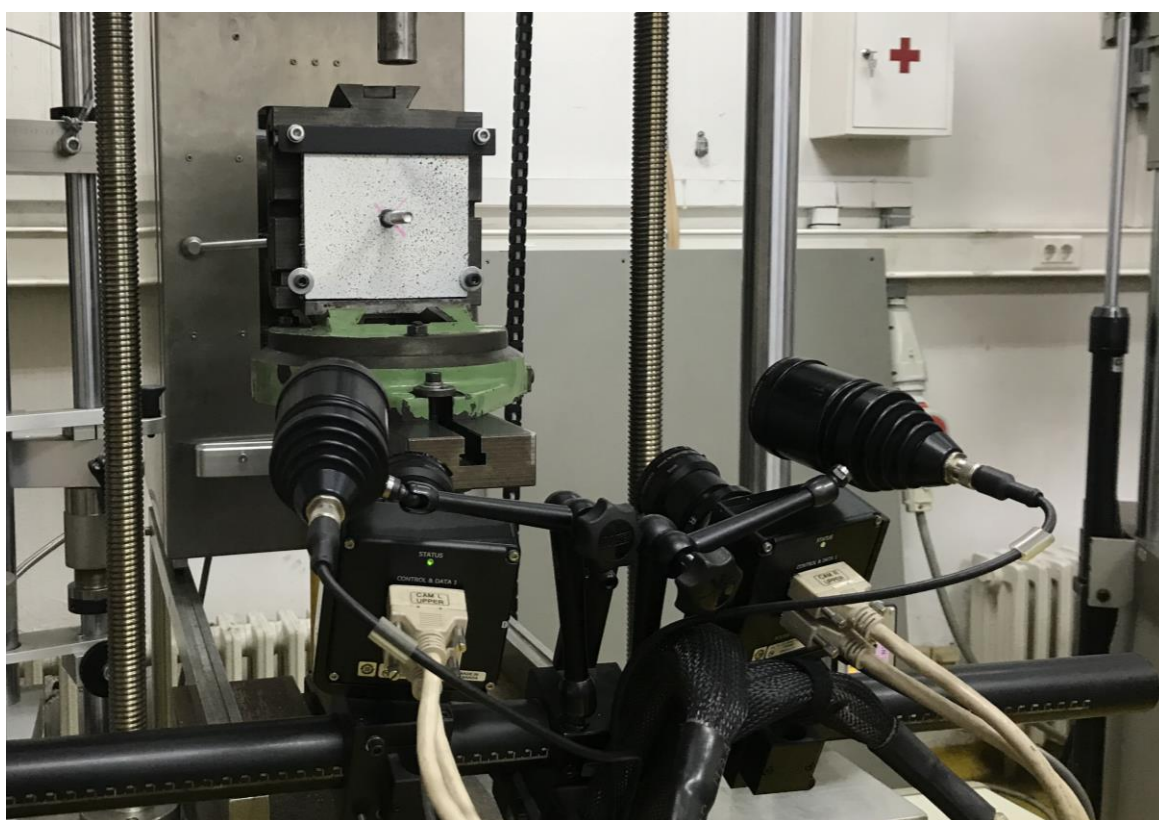
Slika 70. Uzorak T2 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka



Slika 71. Uzorak T3 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka

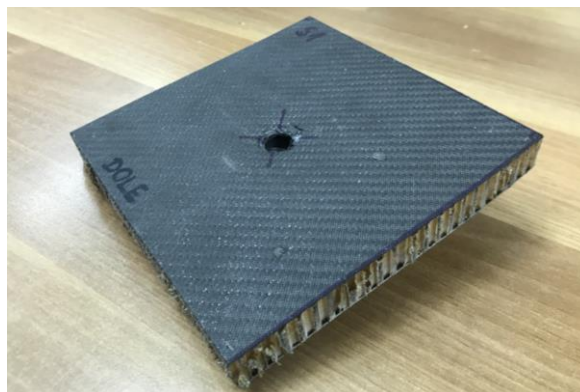
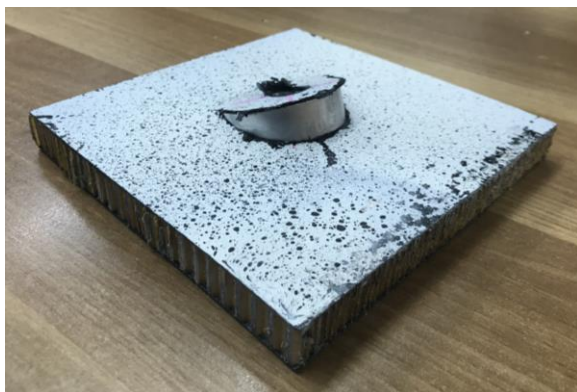
4.3. Testiranje uzoraka opterećenjem na savijanje

Cilj ovog testiranja je određivanje kritičnog opterećenja pri savijanju koje dovodi do narušavanja integriteta kompozitne konstrukcije. Ispitivanje je također provedeno sa tri uzorka sendviča od kojih uzorci S1 i S2 u sebi sadrže aluminijski umetak, a S3 sadrži smolom popunjena saća po cijelom volumenu unutar kružnice Ø50 mm koliko iznosi promjer umetka. Umjesto vijaka M8 korišteni su vijci M12. Eksperimentalni postav prikazan je na slici 72. Brzina opterećivanja je kao i kod prethodnog testiranja iznosila 3,5 mm/min.

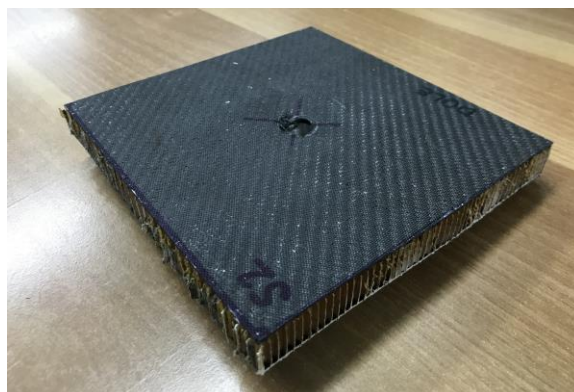


Slika 72. Eksperimentalni postav kod ispitivanja uzoraka savijanjem

Na slici 73. a) prikazana je gornja strana uzorka S1 nakon popuštanja uzorka, a na slici 73. b) donja strana. Na slici 74. a) i b) je prikazan uzorak S2, a na slici 75. a) i b) uzorak S3 koji je bio bez aluminijskog umetka.



Slika 73. Uzorak S1 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka



Slika 74. Uzorak S2 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka

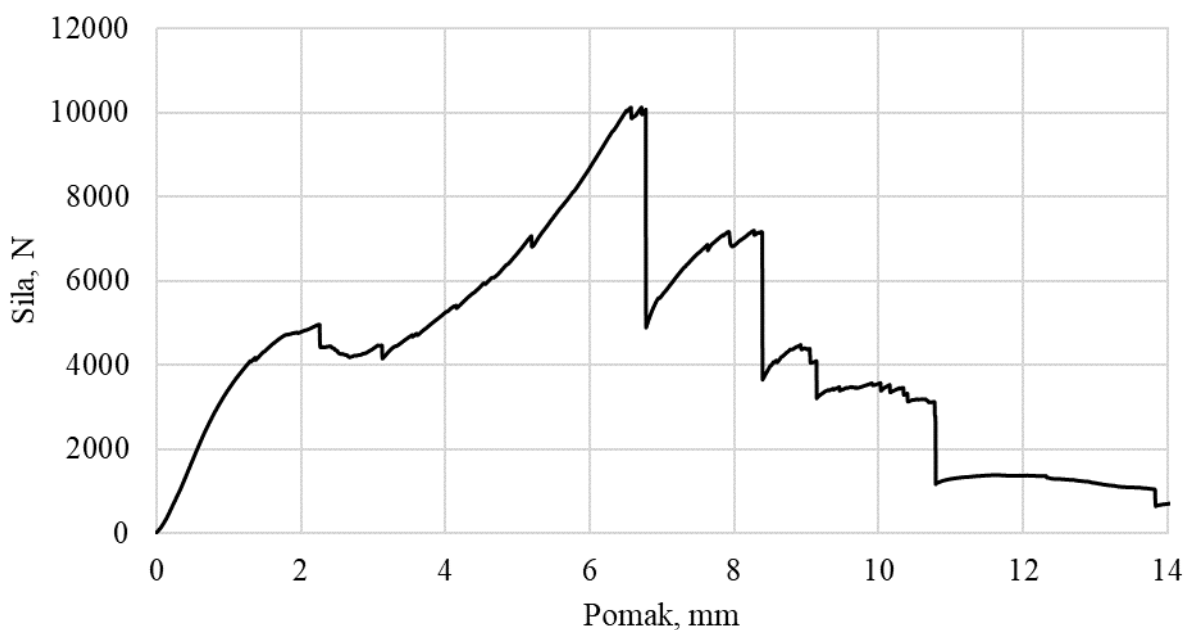


Slika 75. Uzorak S3 nakon testiranja: a) gornja strana uzorka i b) donja strana uzorka

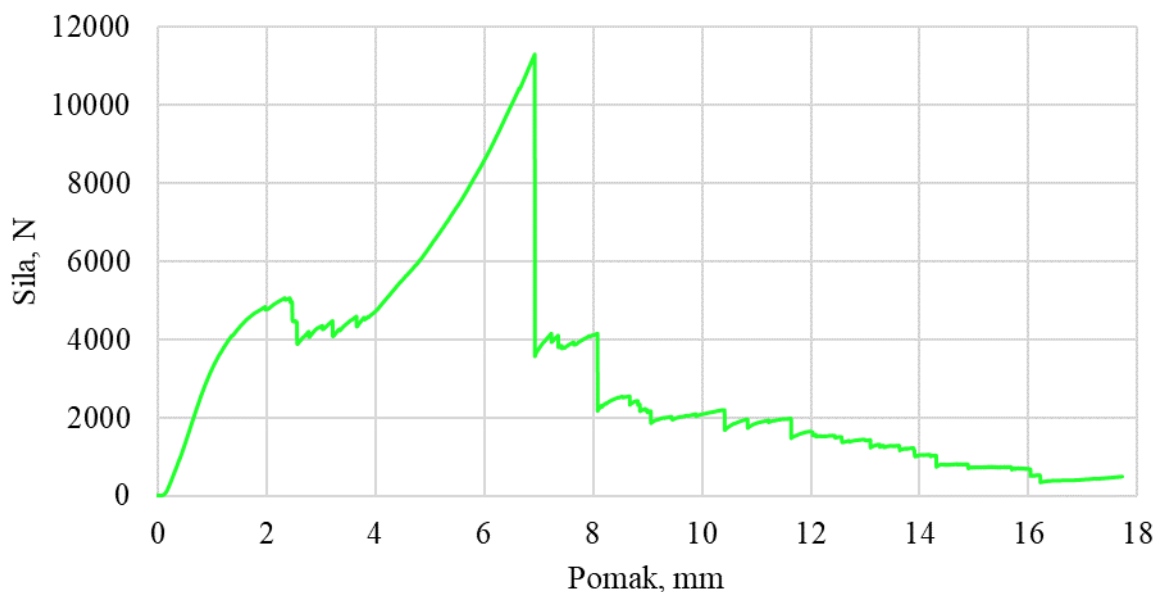
5. REZULTATI

5.1. Rezultati ispitivanja uzoraka pri tlačnom opterećenju

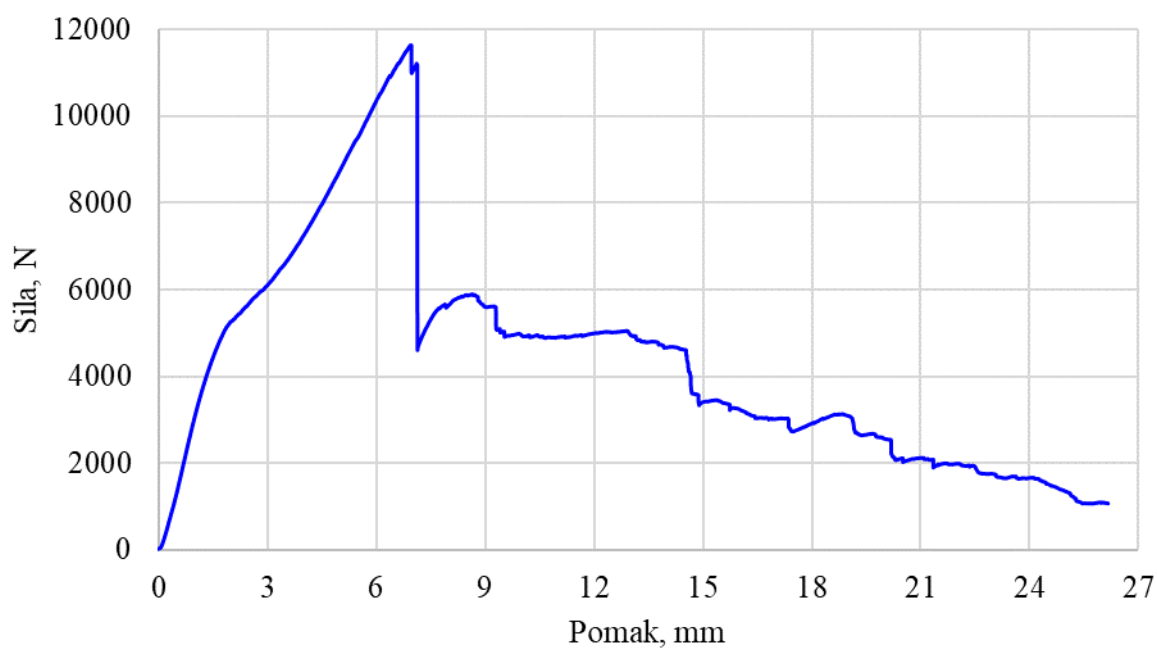
Na slici 76 prikazan je dijagram ovisnosti sile o pomaku za uzorak T1, na slici 77 za uzorak T2, a na slici 78 za uzorak T3. Radi lakše usporedbe krivulje sila-pomak za sva tri uzorka prikazane su dijagramski na slici 79. U tablici 12 prikazani su iznosi kritičnih tlačnih opterećenja za navedene uzorke.



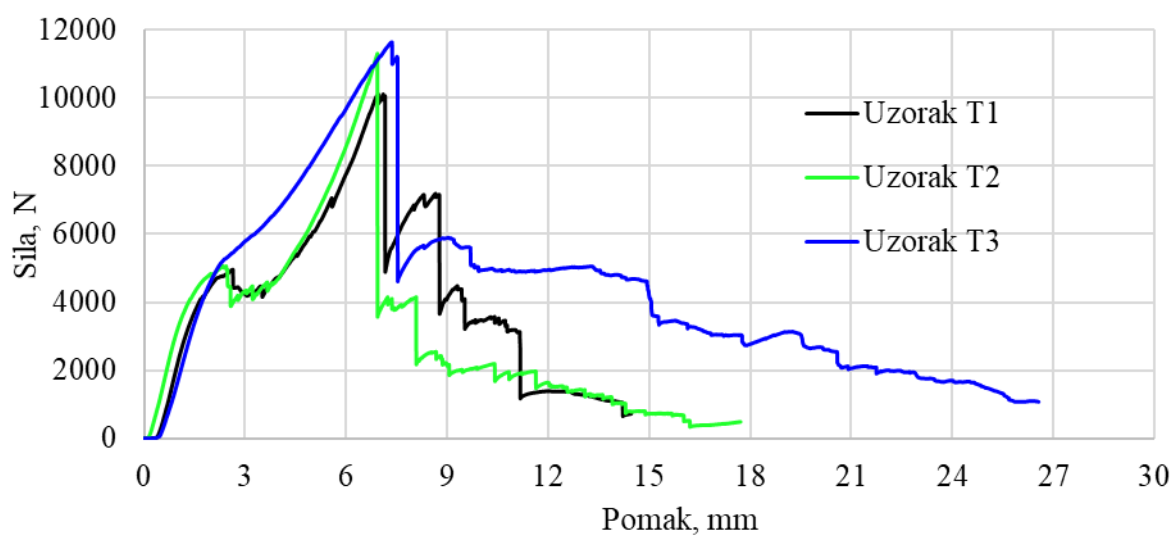
Slika 76. Dijagram sila-pomak za uzorak T1



Slika 77. Dijagram sila-pomak za uzorak T2



Slika 78. Dijagram sila-pomak za uzorak T3



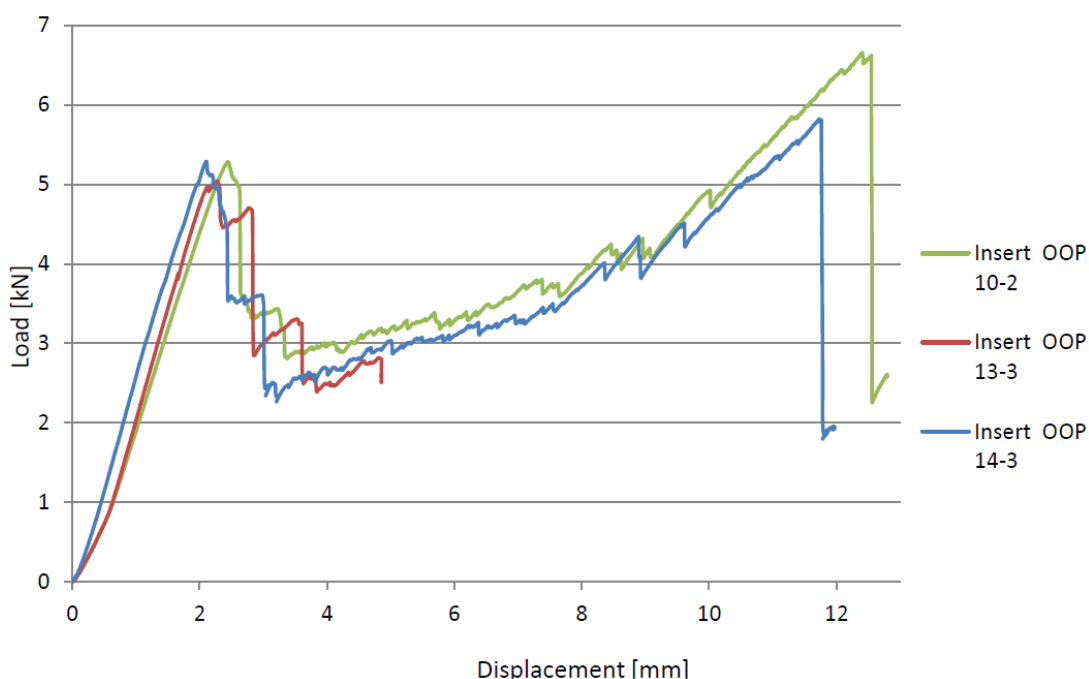
Slika 79. Dijagram sila-pomak za uzorke T1, T2 i T3

Tablica 12. Iznosi maksimalnih sila za uzorke T1, T2 i T3

Uzorak	Iznos maksimalne sile, N
T1	10110
T2	11305
T3	11641

5.1.1. Usporedba rezultata sa Revolve NTNU Formula Student timom – testiranja uzoraka tlačnim opterećenjem

U ovom poglavlju dana je usporedba s rezultatima tlačnog testiranja umetaka norveškog FS tima *Revolve NTNU*. Tim je koristio jednaku metodu laminiranja kao i ona opisana u ovom radu, a kao sredstvo povezivanja aramidnih saća debljine 12,7 mm i umetaka je koristio samo-ekspandirajuću epoksidnu smolu. Dimenzije uzoraka su iznosile od 200 x 200 mm, s dva sloja ugljičnih vlakana sa svake strane sendviča za razliku od tri sloja korištena u ovom radu, a umetci su bili izrađeni od ploče vlaknatice srednje gustoće (engl. *medium density fibreboard – MDF*) promjera Ø47 mm. Njihovi rezultati testiranja uzoraka tlačnim opterećenjem su prikazani na slici 80.

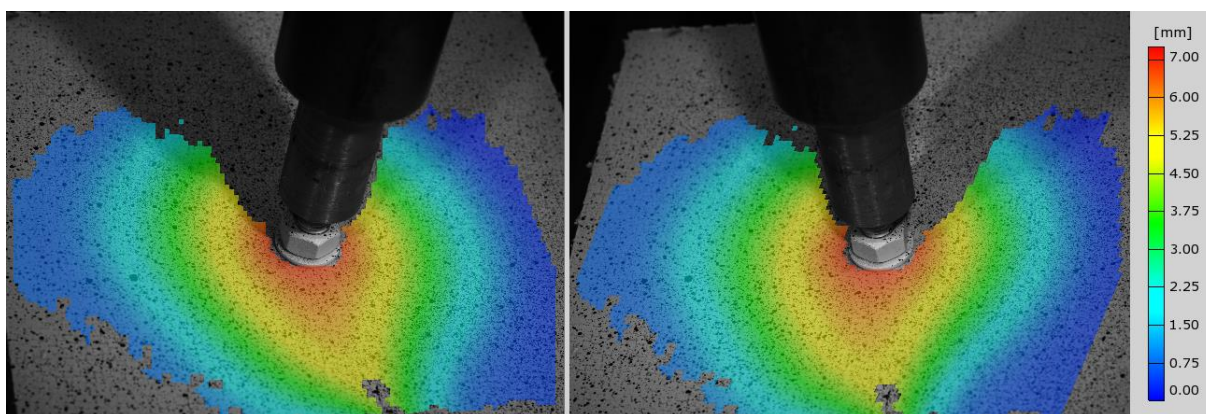


Slika 80. Dijagram sila-pomak tlačnog ispitivanja uzoraka FS tima *Revolve NTNU* [7]

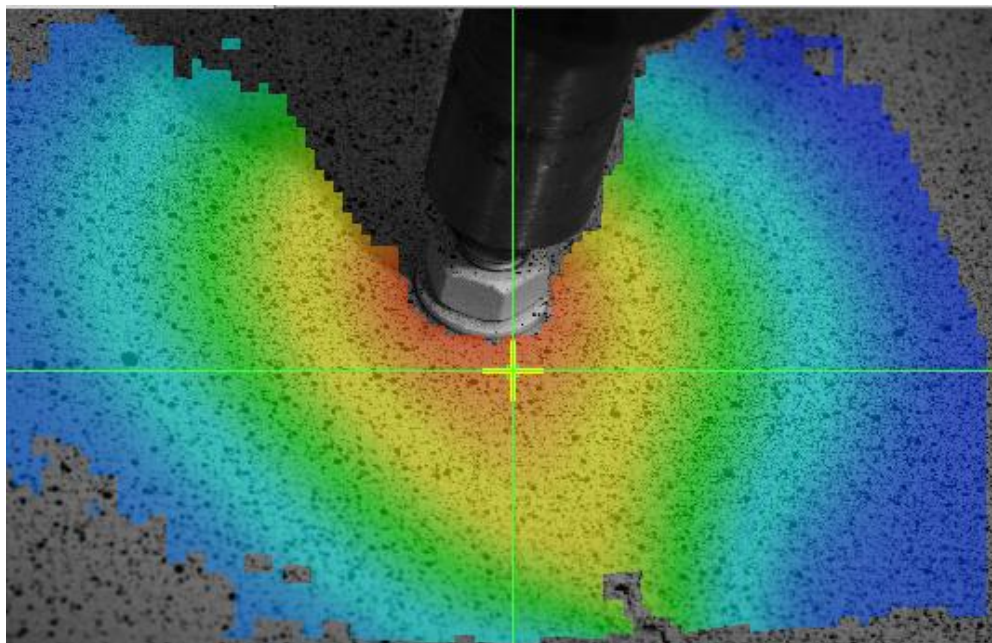
Podaci koji su mjerodavni za usporedbu su rezultati uzoraka *Insert OOP 13-3* označen crvenom bojom i *Insert OOP 14-3* označen plavom bojom na slici 80, a pokazuju da su njihovi uzorci sendvič konstrukcije izdržali maksimalnu silu manju od 7 kN, dok je maksimalna sila slične sendvič konstrukcije ispitane u okviru ovog rada iznosila na nešto više od 11 kN. Treba uzeti u obzir da su uzorci norveškog tima imali manje ugljičnih vlakana, manju debljinu saća, drugi tip umetaka i povezivanja umetka s ispunom. Iz rezultata je također vidljivo da dijagrami sila-pomak norveškog tima i ovog rada imaju sličan oblik.

5.1.2. Pomaci i deformacije uzoraka testiranih tlačnim opterećenjem

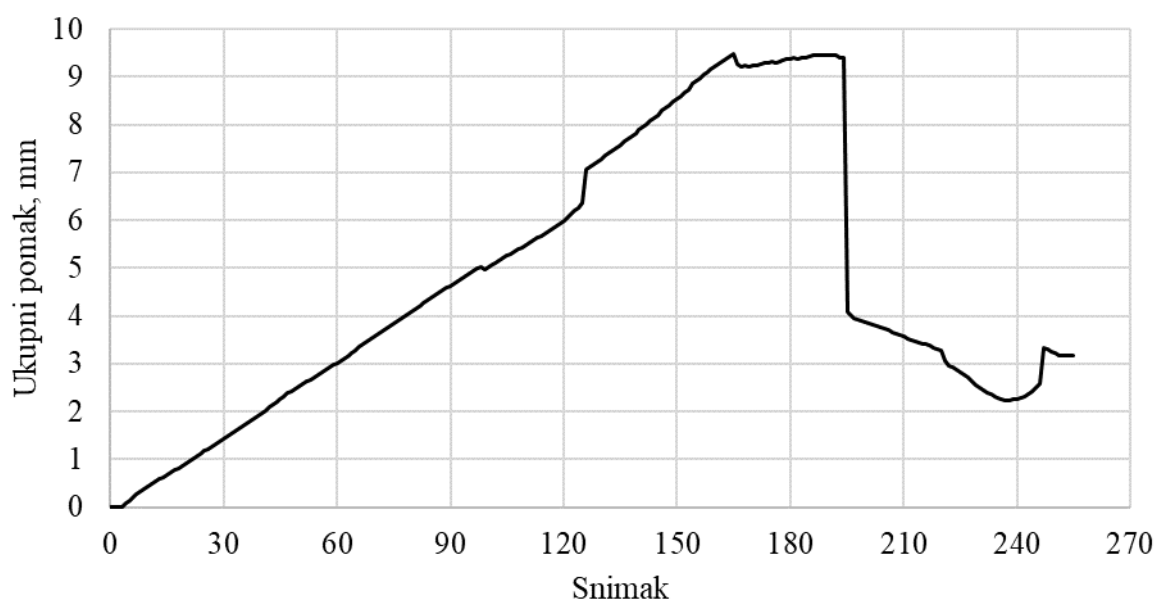
Pored određivanja kritičnog tlačnog i savojnog opterećenja uzoraka, u radu je također potrebno odrediti polje pomaka i deformacija na mjestu spoja umetka i kompozitne sendvič strukture. Na slici 81 prikazano je polje pomaka uzorka T1 snimljeno lijevom i desnom kamerom nakon 125. sekunde testiranja, budući da je brzina snimanja postavljena na 1 snimak/sekunda. Slika 82 prikazuje položaj karakteristične odabrane točke za određivanje dijagrama pomak-snimka prikazan na slici 83.



Slika 81. Polje pomaka uzorka T1 na 125. snimku

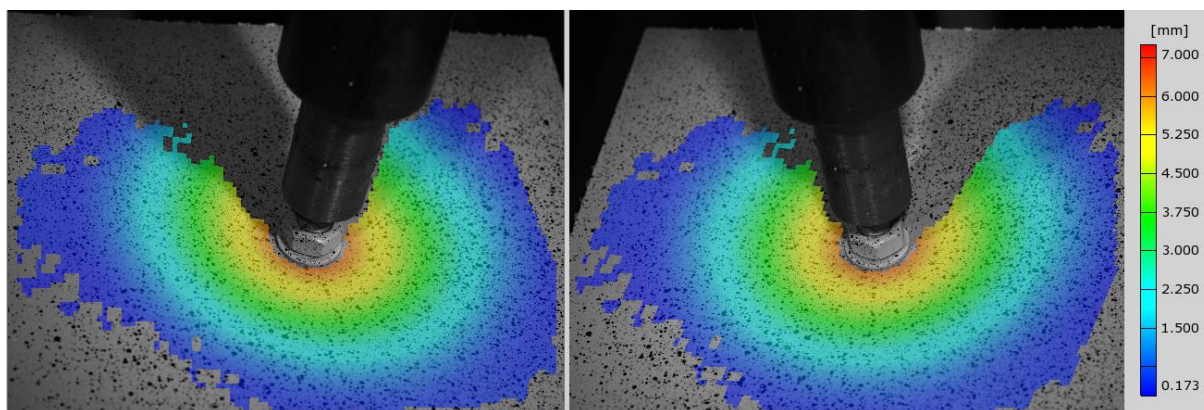


Slika 82. Položaj izabrane točke za dobivanje dijagrama ukupni pomak-snimak

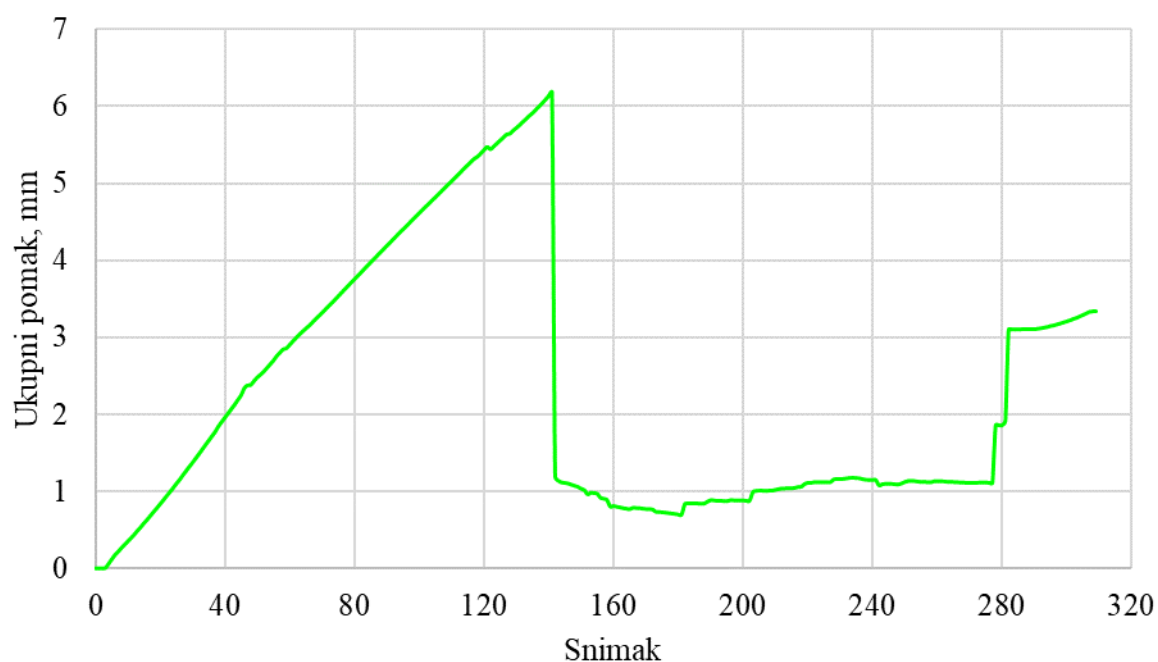


Slika 83. Dijagram ukupni pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka T1

Na slici 84 prikazano je polje pomaka uzorka T2 snimljeno lijevom i desnom kamerom na 121. snimku, a slika 85 prikazuje dijagram pomak-snimak za isti uzorak, na temelju točke postavljene na istom mjestu kao i kod uzorka T1.

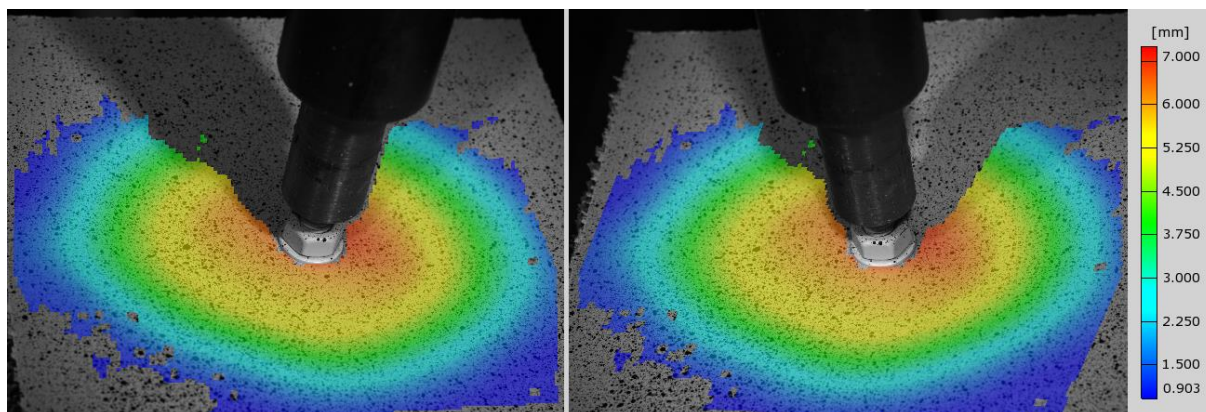


Slika 84. Polje pomaka uzorka T2 na 121. snimku

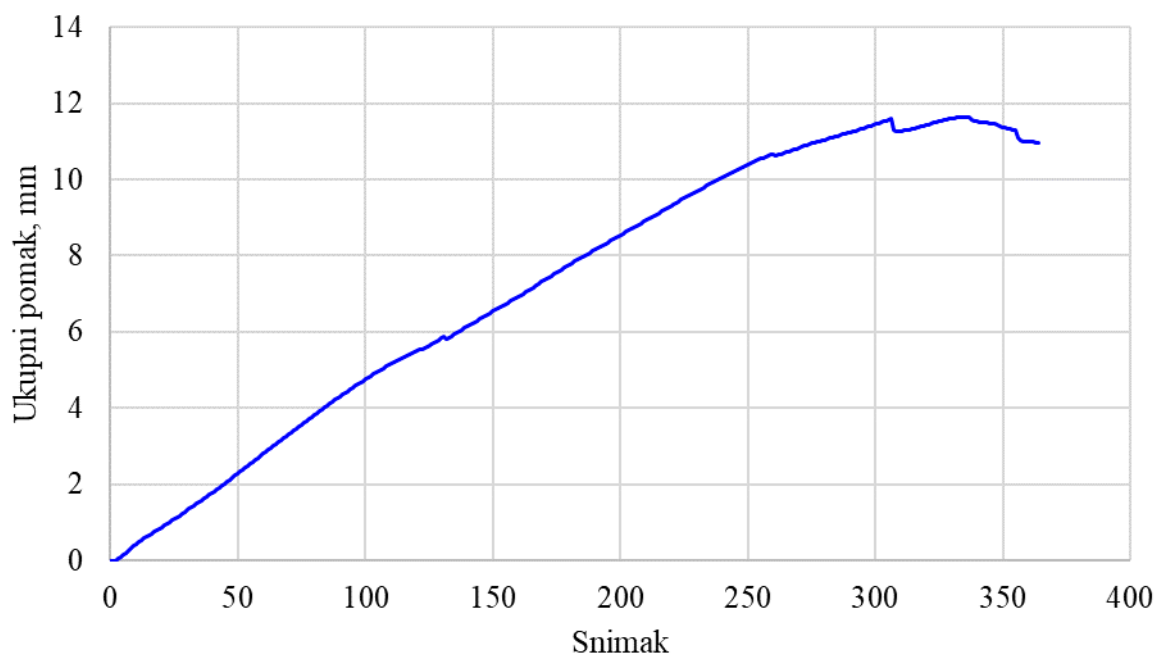


Slika 85. Dijagram ukupni pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka T2

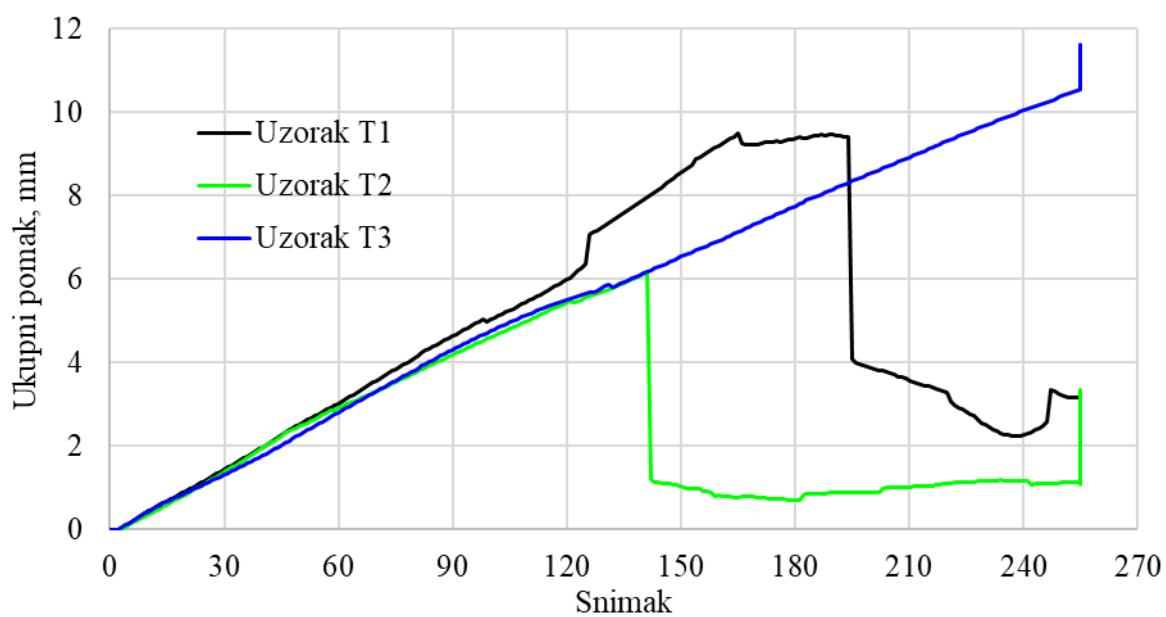
Na slici 86 prikazano je polje pomaka uzorka T3 na 128. snimku, a slika 87 prikazuje dijagram pomak-snimak na temelju odabrane točke kao i kod uzoraka T1 i T2. Na slici 88 dani su rezultati mjerenja za sva tri uzorka.



Slika 86. Polje pomaka uzorka T3 na 128. snimku

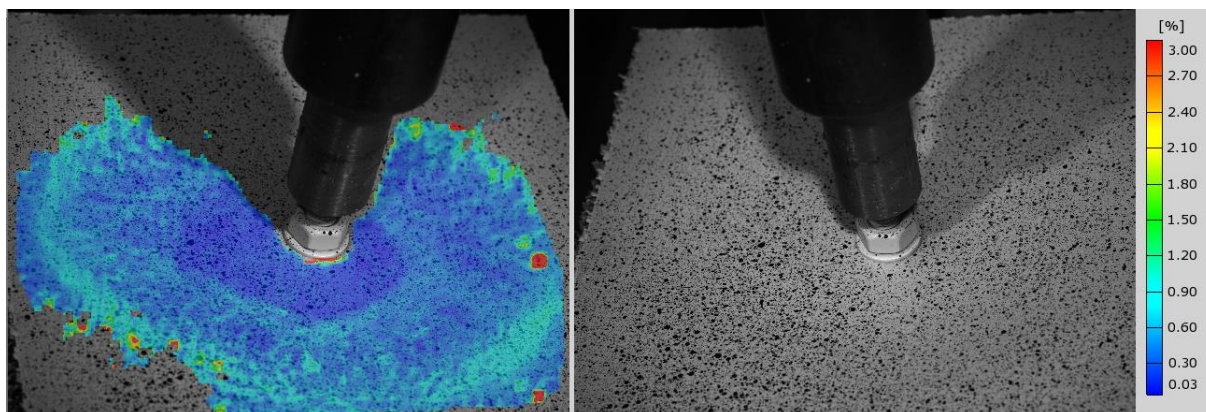


Slika 87. Dijagram ukupni pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka T3

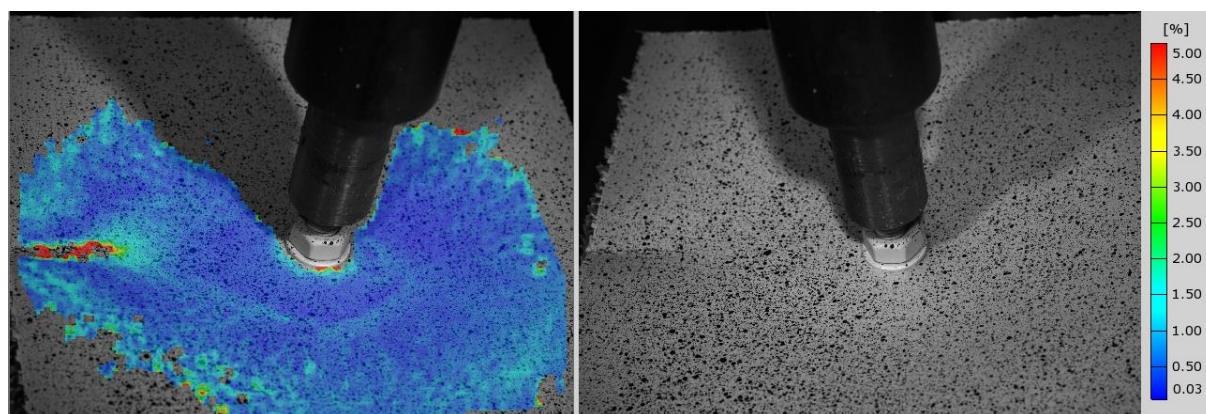


Slika 88. Dijagrami pomak-snimak za karakterističnu točku uzoraka T1, T2 i T3

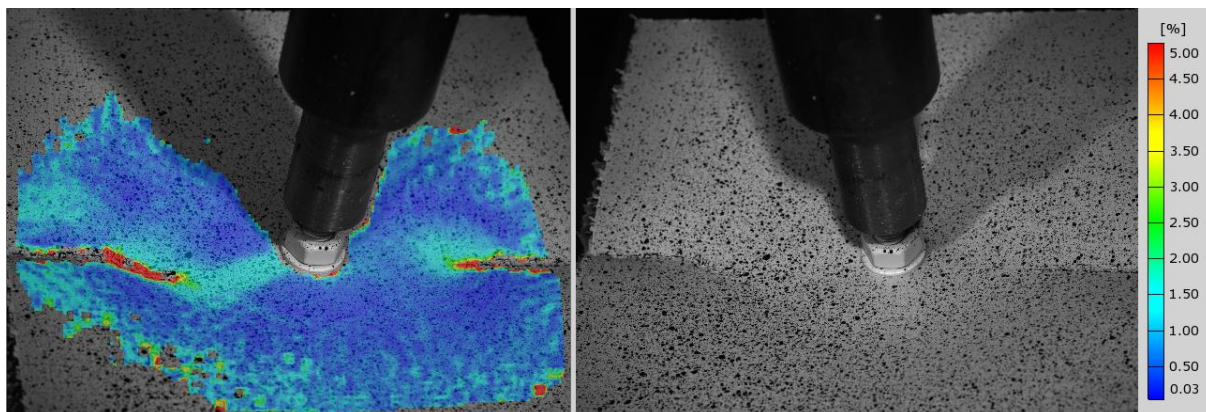
Na slici 89 prikazano je polje deformacija po von Misesu prije prvog pucanja kompozita (snimak 91). Na slici 90 prikazano je polje deformacija po von Misesu nakon prvog pucanja (snimak 131), dok je na slici 91 prikazano polje deformacija nakon drugog pucanja kompozitne strukture (snimak 181). Prikazana polja deformacija odnose se na uzorak T3.



Slika 89. Polje deformacija uzorka T3 prije prvog popuštanja strukture



Slika 90. Polje deformacija uzorka T3 nakon prvog oštećenja strukture



Slika 91. Polje deformacija uzorka T3 nakon pojave drugog oštećenja strukture

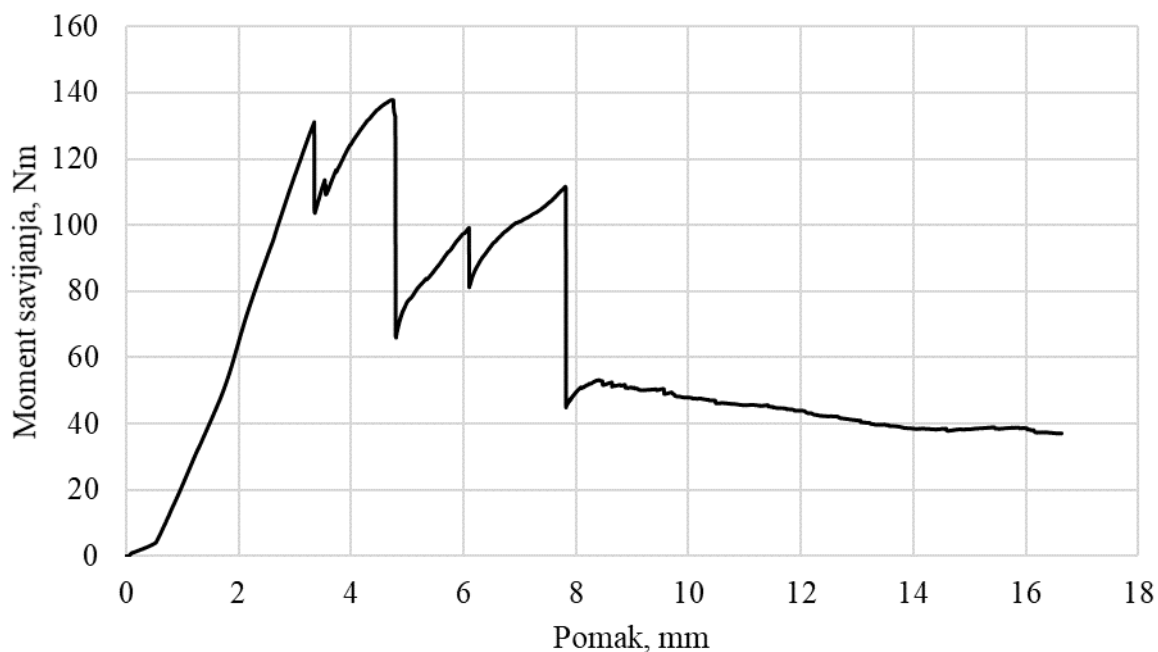
5.1.3. Zaključci testiranja uzoraka tlačnim opterećenjem

Iz slike 79 je vidljivo da uzorci T1 i T2 pucaju na vrlo sličan način s obzirom na to da su i izrađeni od istih komponenti. Uzorak T3 je u ovom testiranju pokazao najbolja svojstva s obzirom na iznos kritične sile, iako u sebi nije sadržavao aluminijski umetak. Na uzorcima s aluminijskim umetkom je došlo do delaminacije kore od ispune, vidljivo na slikama 69 i 70, te do potpunog ispadanja aluminijskog umetka iz sendvič strukture. Uzrok delaminacije vlakana je nedovoljno dobra povezanost kore s ispunom preko smole. Na nekim mjestima je umjesto delaminacije vlakana došlo do potpunog trganja aramidnih saća u vertikalnom smjeru, što znači da je na tim mjestima osigurana dovoljno dobra veza između saća i epoksidne smole.

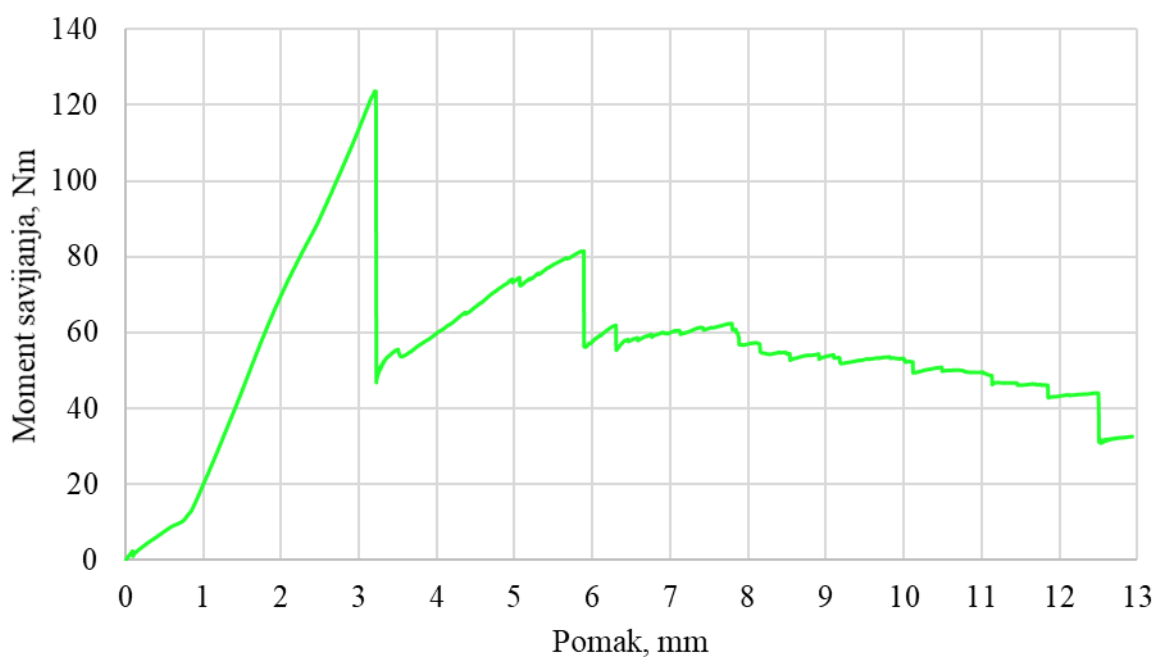
Nagle promjene pomaka karakteristične točke kod uzoraka T1 i T2 odgovaraju pojavi prvih oštećenja strukture pri maksimalnim iznosima sila prema slici 79. Iz ovih rezultata je također vidljivo da je karakterističnu točku kod uzorka T3 trebalo odabrati na drugom mjestu budući da nije registrirala pojavu prvih oštećenja kompozitne strukture. Karakteristična točka kod uzoraka je odabrana kako bi se međusobno mogli usporediti rezultati za pomake ispod vijka za uzorke sa i bez umetka. S obzirom na različitost uzoraka nije bilo za očekivati da će odabrana točka kod sva tri uzorka registrirati i pojavu prvih oštećenja što pokazuje rezultat za uzorak T3.

5.2. Rezultati testiranja uzoraka opterećenjem na savijanje

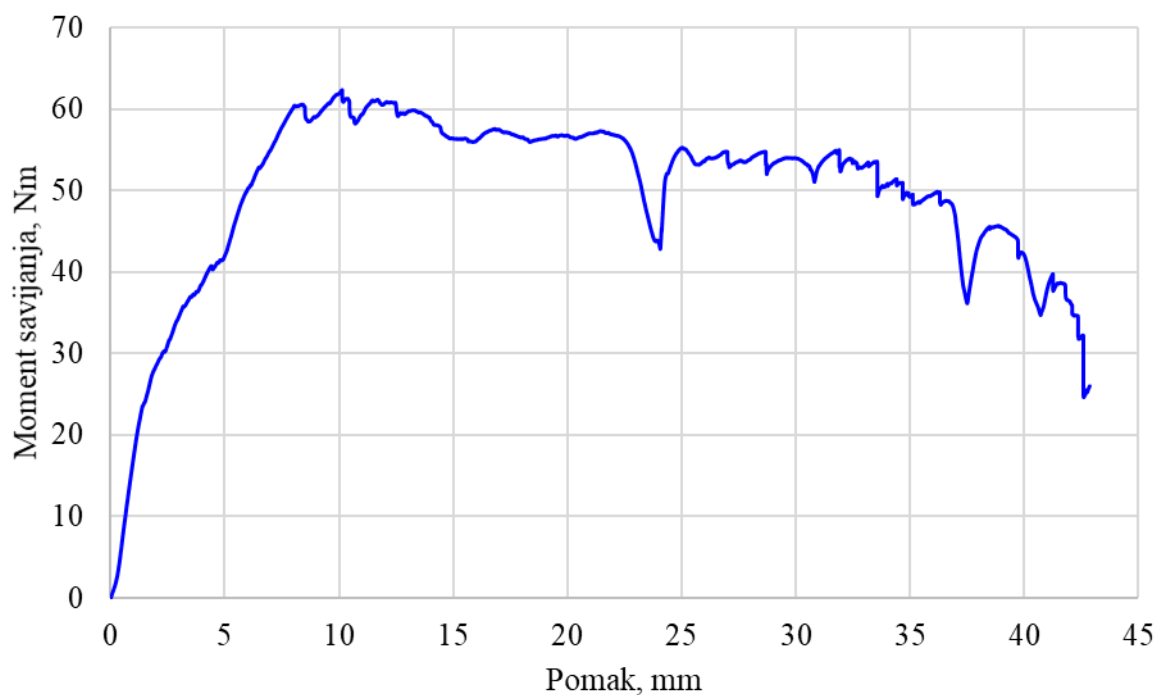
Na slici 92 prikazan je dijagram ovisnosti momenta savijanja o pomaku za uzorak S1, na slici 93 za uzorak S2, a na slici 94 za uzorak S3. Na slici 95 prikazane su krivulje sva tri uzorka, radi lakše usporedbe rezultata. U tablici 13 prikazani su iznosi kritičnih opterećenja pri savijanju za sva tri uzorka.



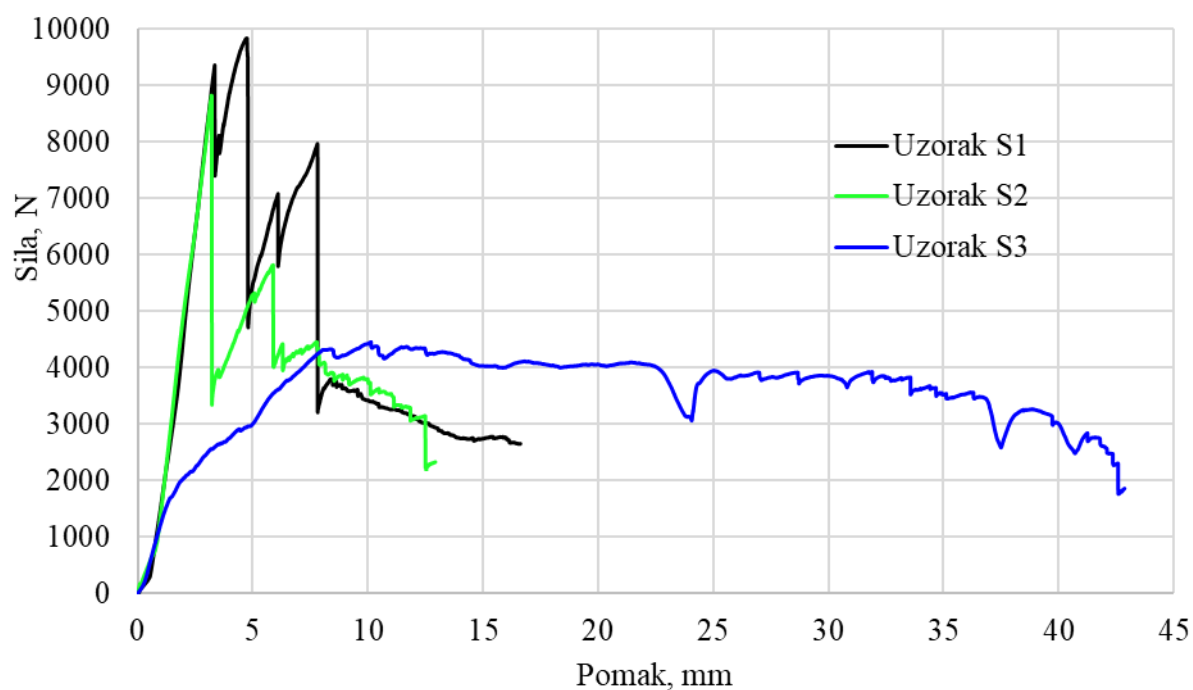
Slika 92. Dijagram moment savijanja-pomaku za uzorak S1



Slika 93. Dijagram moment savijanja-pomak za uzorak S2



Slika 94. Dijagram moment savijanja-pomak za uzorak S3



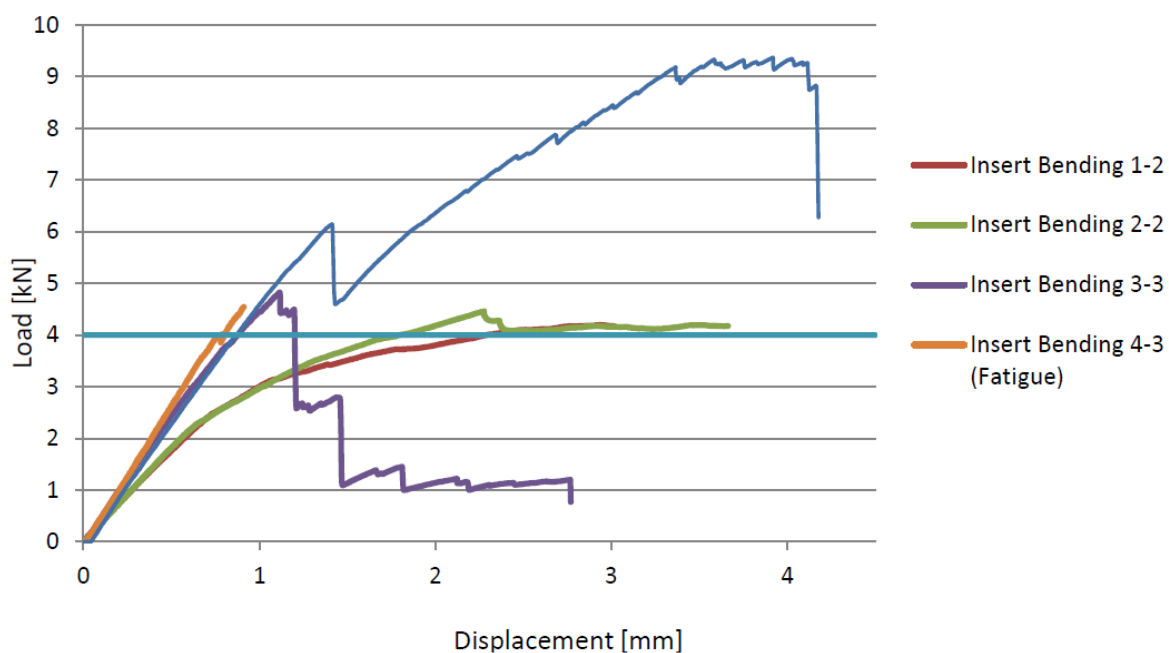
Slika 95. Dijagram sile-pomak za uzorke S1, S2 i S3

Tablica 13. Iznosi sile i momenata savijanja za uzorke S1, S2 i S3

Uzorak	Iznos maksimalne sile, N	Iznos maksimalnog momenta savijanja, Nm
S1	9837	138
S2	8824	124
S3	4455	62

5.2.1. Usporedba rezultata sa Revolve NTNU Formula Student timom – testiranja uzoraka opterećenjem na savijanje

Kod testiranja uzoraka na savijanje, ovaj tim je koristio ispunu sendviča od aluminijskih saća debljine 20 mm, nešto veće umetke promjera Ø76 mm, vrstu spajanja kore s ugljičnim vlaknima pomoću epoksidne samo-ekspandirajuće pjene te dimenzije uzoraka od 220 x 220 mm. Kao i kod tlačnog testa koristili su dva sloja ugljičnih vlakana sa svake strane sendviča. Rezultati testiranja uzoraka na savijanje prikazani su na slici 96.

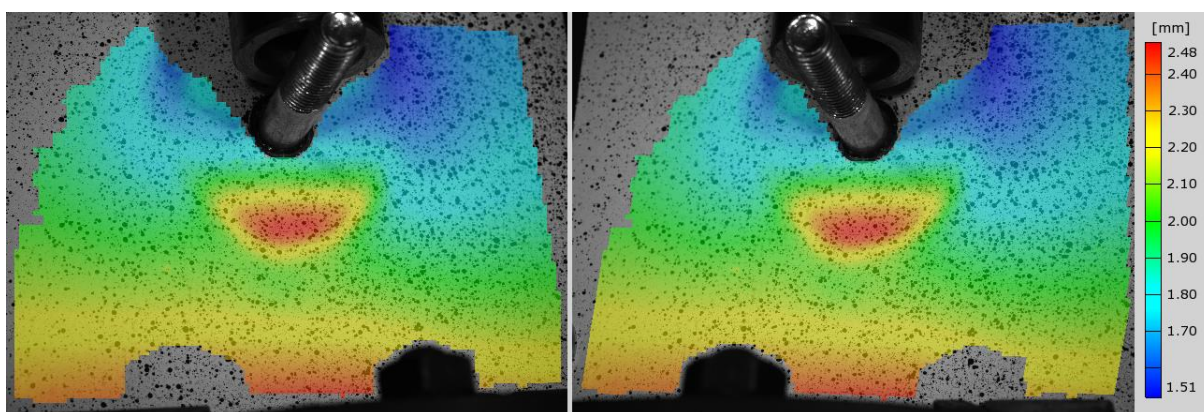


Slika 96. Dijagram ovisnosti sile o pomaku za opterećenje uzoraka na savijanje FS tima Revolve NTNU [7]

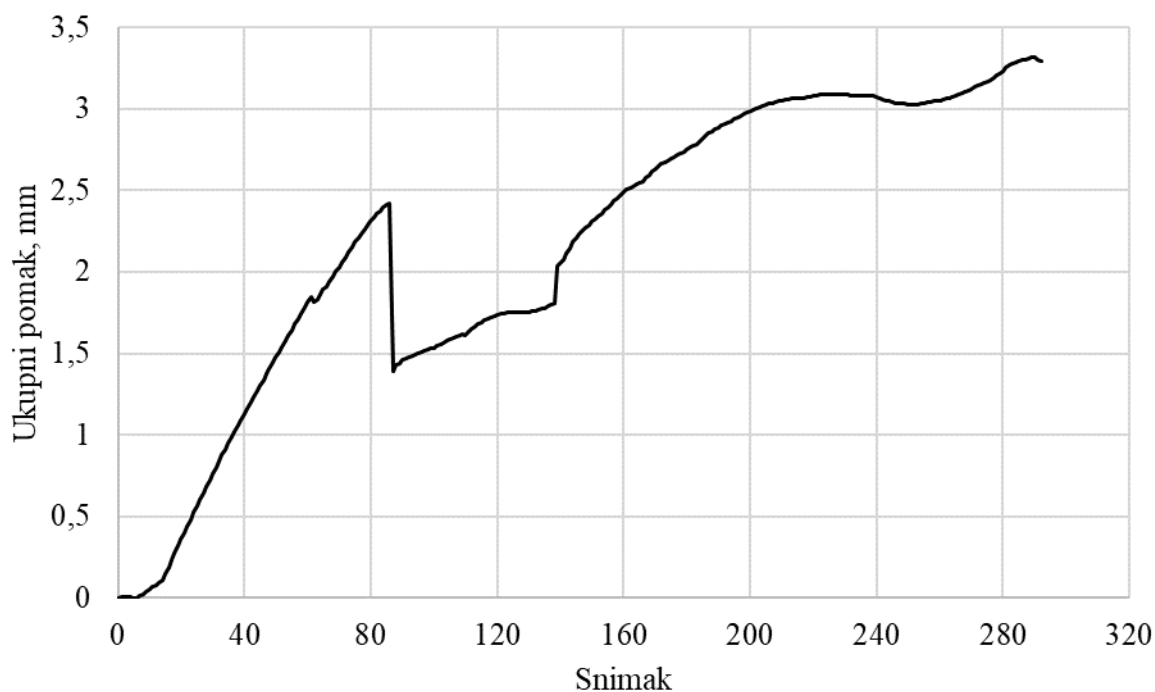
Podaci iz ovog testiranja se gotovo u potpunosti ne mogu usporediti sa podacima dobivenih testiranjima u ovom radu, zbog skoro potpuno drugačijih vrsta komponenata sendvič konstrukcije. No isto kao i za testiranja tlačnim opterećenjem, mogu se izvući generalni komentari. Iz slike 96 je vidljivo kako je uzorak 4-3 pucao na nešto manje od 5 kN, dok je najčvršći po ovom dijagramu uspio izdržati nešto više od 9 kN. Iznos maksimalne sile sendvič konstrukcije u okviru ovog rada za isti slučaj opterećenja iznosi također nešto više od 9 kN. Iz ove usporedbe bi se dalo zaključiti kako različite vrste sendvič konstrukcija u konačnici mogu davati približno jednake iznose maksimalnih sila.

5.2.2. Pomaci i deformacije uzoraka testiranih opterećenjem na savijanje

Na jednak način kao i kod tlačnog opterećenja i kod savijanja je određeno polje pomaka i deformacija na mjestu spoja umetka i kompozitne sendvič strukture. Na slici 97 prikazano je polje pomaka uzorka S1 snimljeno lijevom i desnom kamerom u 86. koraku opterećivanja. Brzina snimanja je također postavljena na 1 snimak/sekunda. Karakteristična točka potrebna za dobivanje dijagrama snimak-pomak je imala sličan položaj kao i kod tlačnog ispitivanja uzoraka. Dijagram pomak-snimak za uzorak S1 prikazan je na slici 98.

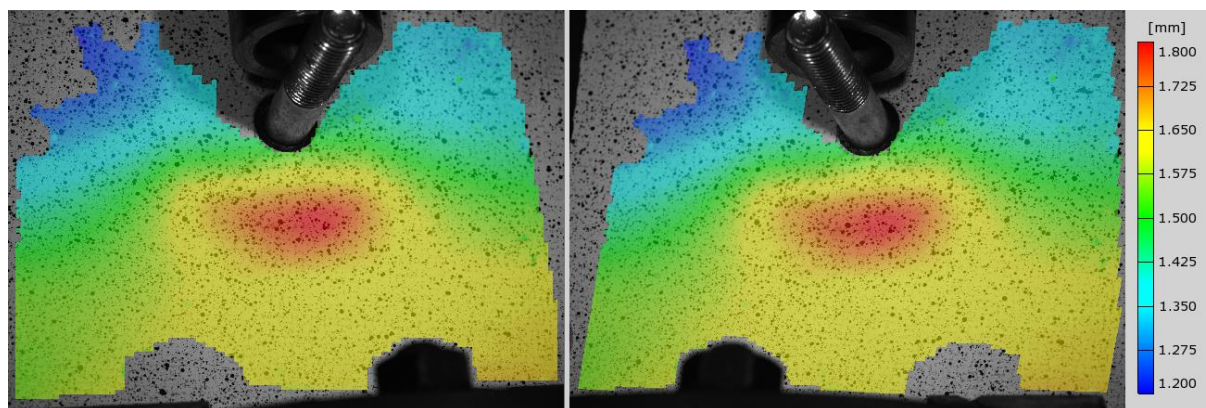


Slika 97. Polje pomaka uzorka S1 na 86. snimku lijeve i desne kamere

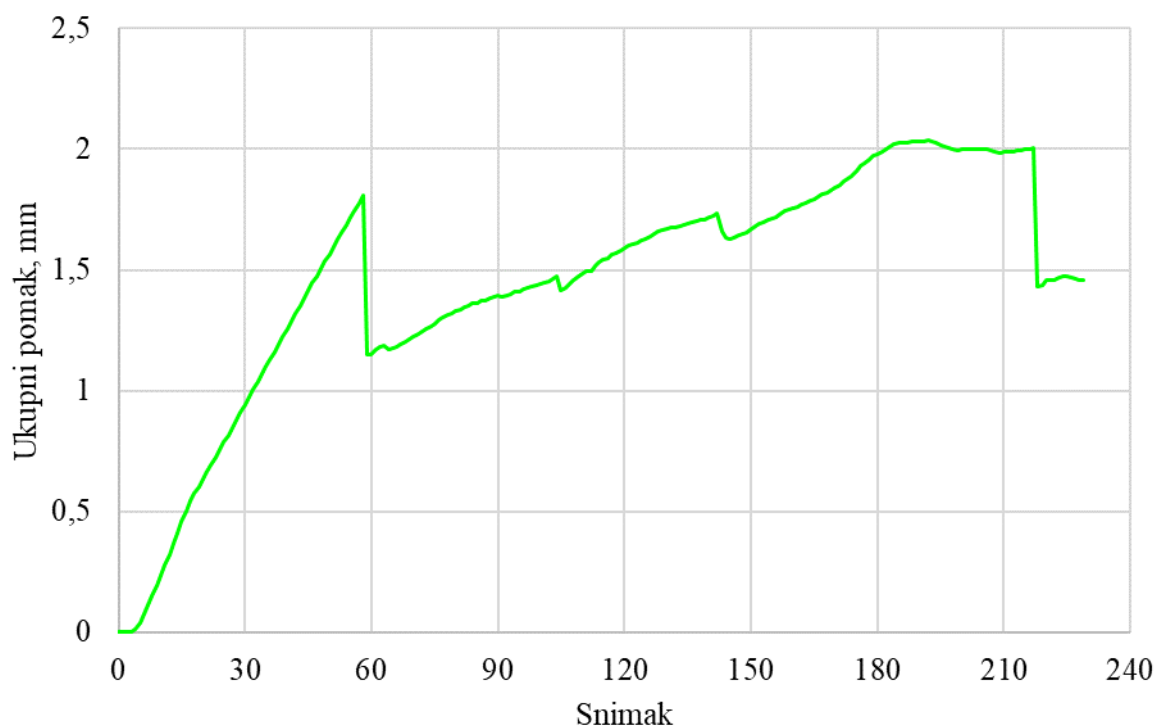


Slika 98. Dijagram pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka S1

Na slici 99 prikazano je polje pomaka uzorka S2 na 57. snimku lijeve i desne kamere, a slika 100 prikazuje dijagram pomak-snimak za isti uzorak dobiven pomoću iste karakteristične točke postavljene kao i kod uzorka S1.

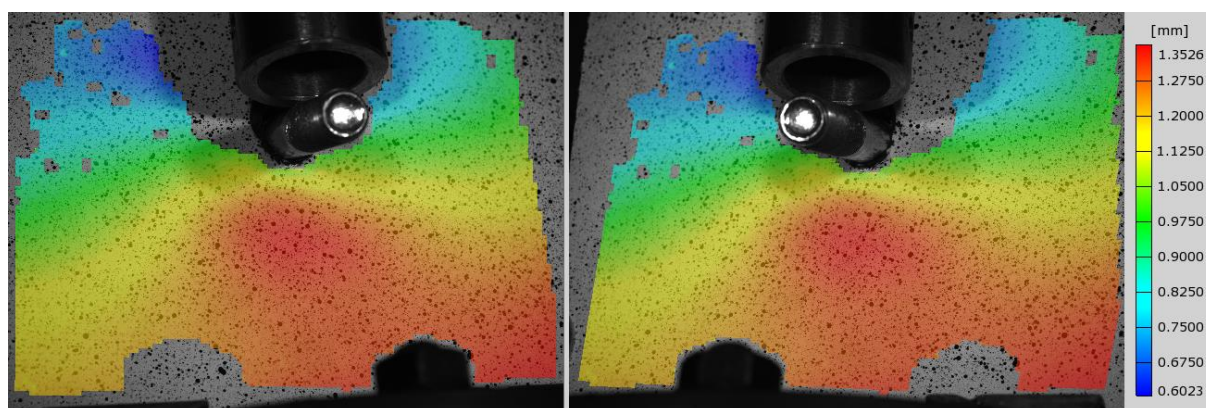


Slika 99. Polje pomaka uzorka S2 na 57. snimku obje kamere

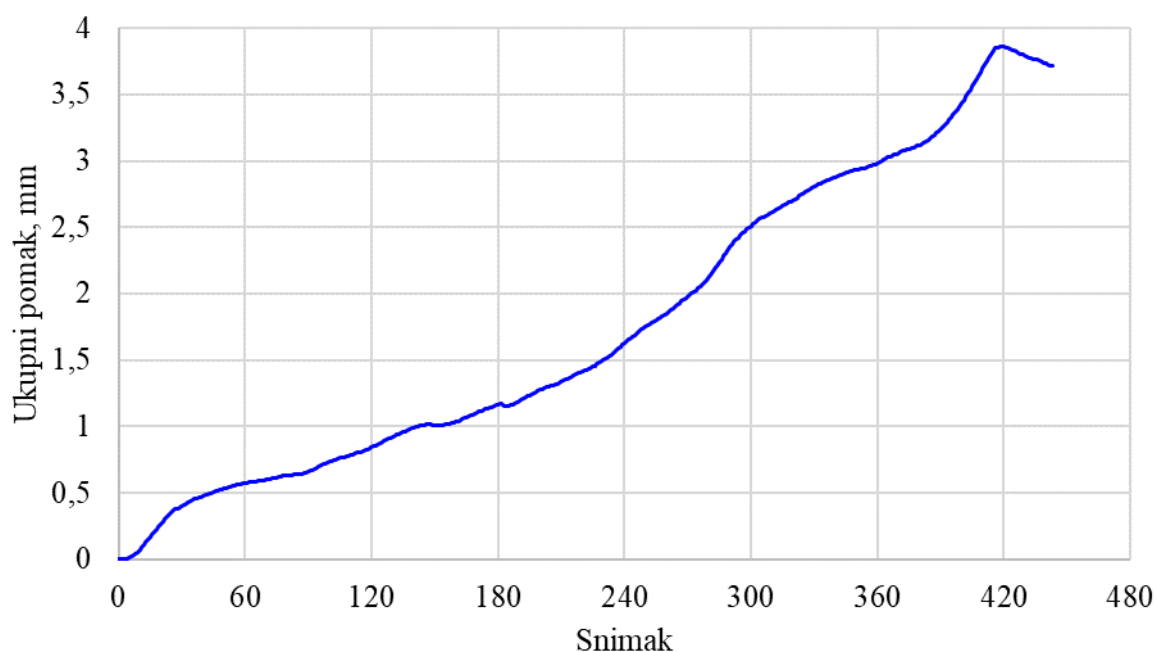


Slika 100. Dijagram pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka S2

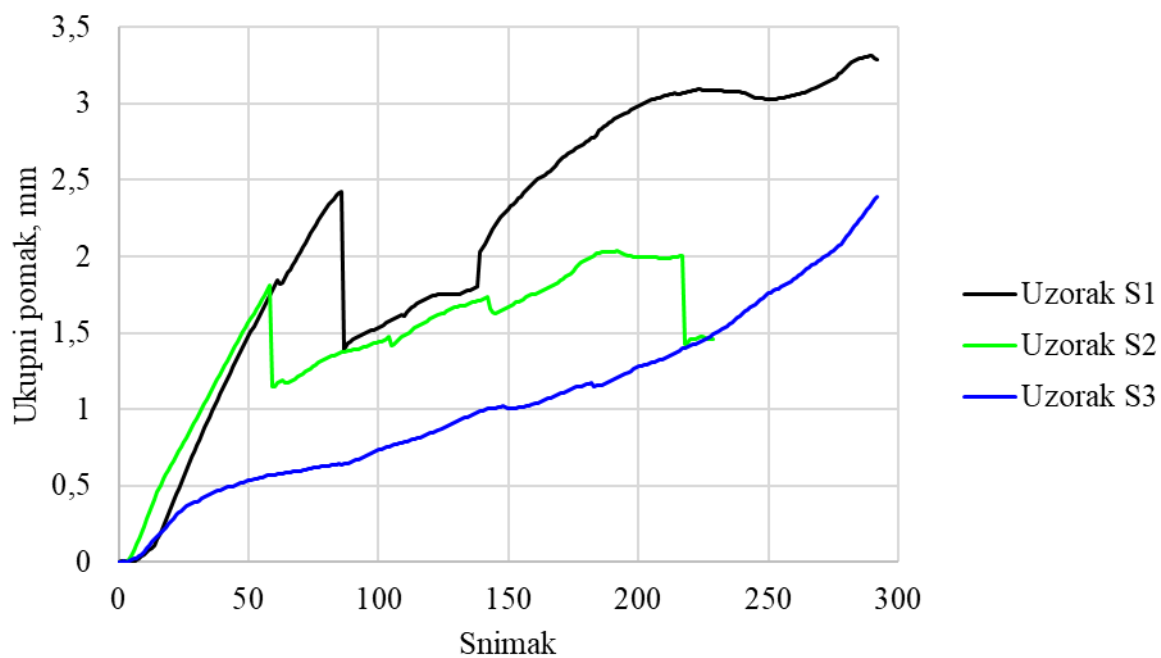
Na slici 101 prikazano je polje pomaka uzorka S3 snimljeno lijevom i desnom kamerom na 201. snimku, a slika 102 prikazuje dijagram pomak-snimak za isti uzorak na temelju karakteristične točke kao i kod uzoraka S1 i S2. Slika 103 prikazuje rezultate sva tri uzorka pri opterećenju na savijanje.



Slika 101. Polje pomaka uzorka S3 na 201. snimku

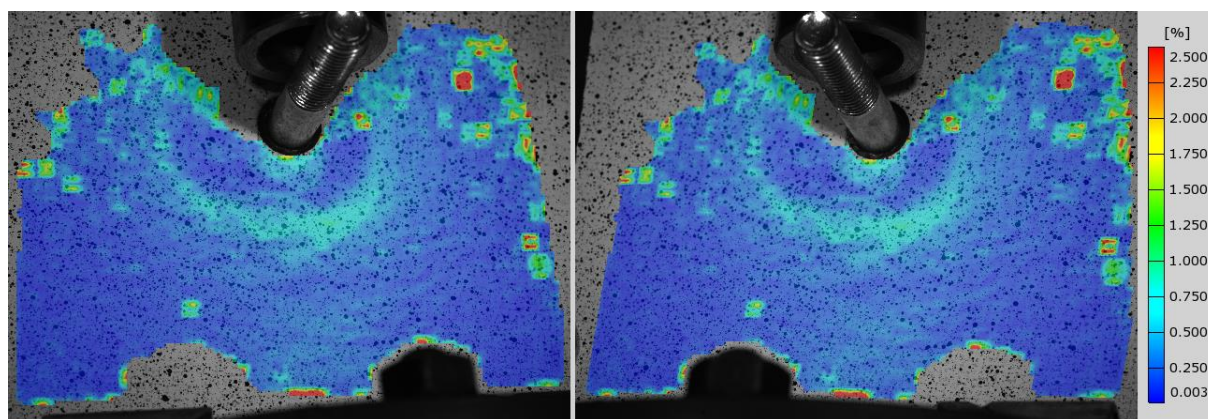


Slika 102. Dijagram pomak-snimak za karakterističnu točku uzorka S3



Slika 103. Dijagrami pomak-snimak za karakterističnu točku uzoraka S1, S2 i S3

Na slici 104 prikazano je polje deformacija po von Misesu za uzorak S2 na 57. snimku obje kamere.



Slika 104. Polje deformacija uzorka S2 za snimak 57

5.2.3. Zaključci testiranja uzoraka opterećenjem na savijanje

Za razliku od testiranja na tlak gdje je uzorak T3 bez aluminijskog umetka pokazao najveću čvrstoću, u ovom testiranju uzorak S3 istog postava je podnio najmanje opterećenje na savijanje u usporedbi s uzorcima S1 i S2 koji su u sebi sadržavali aluminijski umetak. Na slikama 73 i 74 na bočnim stranama aluminijskog umetka vidljivo je kako je došlo do potpunog odvajanja smole od površine umetka. Može se pretpostaviti da je uzrok lošijeg rezultata kod uzorka S3 posljedica još uvijek nedovoljno očišćene i masne površine bočne strane umetka koja je onemogućavala smoli da se dobro primi na površinu umetka. Ta činjenica daje podlogu za nove ideje vezane uz dodatno osiguranje umetka od potpunog ispadanja iz sendviča. Pored parametra umješnosti pripreme samog sustava poput dobrog čišćenja bočnih strana, spoj umetka i sendviča bi se mogao dodatno učvrstiti urezivanjem grubog navoja na bočne strane, bušenjem malih provrta ili nekim drugim načinom postizanja grublje površine bočne strane umetka. Na taj način bi se smola uklinila sa umetkom i stvorila jaču vezu između saća i umetka.

Pomaci kod uzorka S3 su znatno manji od onih kod uzoraka S1 i S2 što je očekivano s obzirom na manji iznos postignute maksimalne sile opterećenja.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bilo je eksperimentalno ispitivanje veze umetka i kompozitne nosive konstrukcije kod bolida Formule Student pri tlačnom i savojnom opterećenju.

Ispitivanje uzoraka pri tlačnom opterećenju je pokazalo da je uzorak sendvič konstrukcije T3 bez aluminijskog umetka izdržao najveću silu od 11,6 kN, dok je kos uzorka T1 sila iznosila 10,1 kN, a kod uzorka T2 11,3 kN. Za razliku od tlačnog opterećivanja, uzorak S3 bez aluminijskog umetka je pri savijanju izdržao znatno manju silu iznosa svega 4,4 kN, u usporedbi s uzorkom S1 koji je izdržao 9,8 kN i uzorku S2 koji je izdržao 8,8 kN.

Iz ovih podataka se može zaključiti da uzorci ispitani u ovom radu prema pravilniku konstruiranja Formula Student bolida zadovoljavaju jedino točku T3.40.2 koja zahtjeva da: monocoque točke prihvata za pojaseve protiv podlijetanja vozača (engl. *anti-submarine belts*) moraju izdržati silu od 6.5 kN. Ostala točke nisu zadovoljene što znači da kompozitna nosiva konstrukcija ne pruža dostatnu sigurnost vozaču s obzirom da se ostali iznosi sila u pravilniku penju do 30 kN. Takav rezultat je i očekivan s obzirom da je sendvič konstrukcija izrađena u okviru ovog rada relativno malih dimenzija ispuna i broja slojeva ugljičnih vlakana.

Da bi se dobio bolji uvid u ponašanje ispitane kompozitne strukture pri tlačnom i savojnom opterećenju, potrebna su dodatna ispitivanja s većim brojem uzoraka.

Usporedbom dobivenih rezultata s rezultatima norveškog Formula Student tima *Revolve NTNU* vidljivo je da iznosi maksimalnog tlačnog i savojnog opterećenja u prvom redu ovise o vrsti kompozitne sendvič strukture, a isto tako i o umješnosti proizvodnje same strukture. Navedeni tim je za tlačno opterećene uzorke koristio aramidna saća manje debljine te manji broj slojeva ugljičnih vlakana od onih u ovom radu i drvene umetke jednakog promjera, pa je to uzrok popuštanja uzorka pri sili manjoj od 7 kN. Uzorak opterećen na savijanje su izradili od aluminijskih saća veće debljine od one korištene u ovom radu i s većim promjerom umetka od drva te s manjim brojem ugljičnih vlakana. Očekivano, maksimalna sila tog uzorka je izdržala veće opterećenje od uzorka ispitanog u ovom radu i iznosila je nešto više od 9 kN.

Za monocoque šasiju električnog bolida FSB Racing Team-a ovi će rezultati poslužiti kao vodilja pri konačnom izboru materijala. Rezultati ispitivanja su pokazali da su neophodna poboljšanja kompozitne strukture kao što su povećanje debljine ispune i broja ugljičnih vlakana. Autoklav pečenje sendviča umjesto ručne laminacije i podtlačno oblikovanje nosive konstrukcije vakuumskom pumpom je dodatan parametar s kojim bi se mogla povećati

čvrstoća šasije. Uz navedena poboljšanja, može se pretpostaviti da će monocoque šasija električnog bolid FSBRT06e biti dovoljno čvrsta, kruta, ali i sigurna konstrukcija za uspješno kvalificiranje na Formula Student natjecanjima.

LITERATURA

- [1] Formula Student Rules 2018.
- [2] Matuško M.: Diplomski rad – Uporaba kompozitnih materijala za izradbu nosive konstrukcije vozila Formule Student, Zagreb, 2016.
- [3] http://www.emercedesbenz.com/Images/Aug08/04_Mercedes_Benz_300_SL/444686_737861_768_343_42115171607.jpg
- [4] <http://myautoworld.com/mercedes/history/1950/1950-sl-52/54841.jpg>
- [5] Andersson Eurenus C., Danielsson N., Khokar A., Krane E., Olofsson M., Wass J.: Bachelor Thesis, Analysis of Composite Chassis, Göteborg, Švedska, 2013.
- [6] Projekt Formula Student Strix – FSB Racing Team – Rektorova nagrada, Zagreb, 2017.
- [7] Vedvik N. P.: Master thesis, Design, analysis and testing of joints on carbon fiber composite sandwich chassis, Trondheim, Norveška, 2014.
- [8] Van Kerkhoven, J.D.G.: Master Thesis, Design of a Formula Student race car chassis, Eindhoven, Nizozemska, 2008.
- [9] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Intergrafika TTŽ d.o.o., Zagreb, 2013.
- [10] <https://cdn.crockercommerce.com/0012-products/16263.jpg>
- [11] <http://www.a-c-m.com/Large%20Thumbnails/satinweave5hs.jpg>
- [12] <http://blog.fibreglast.com/fiberglass/the-ins-and-outs-choosing-composite-fabric-by-weave/>
- [13] https://www.openpr.com/images/articles/Q/6/Q62643965_g.jpg
- [14] http://preview.hexion.com/uploadedImages/Micro_Sites/EpoxyPhenolicComposites/Automotive/Your_Process/Prepreg_Illustration_V5.jpg
- [15] <https://insideevs.com/wp-content/uploads/2017/12/Rimac-Autoclave.jpg>
- [16] HexWeb Honeycomb sandwich design technology, Hexcel composites, Duxford, 2000.
- [17] <http://www.polistmodel.com/wp-content/uploads/2015/04/chsis2-455x270.jpg>
- [18] <https://system.eu2.netsuite.com/core/media/media.nl?id=3893&c=3937524&h=796ff06d8e85a7a2a4aa>
- [19] <https://cdn.crockercommerce.com/0012-products/10953.jpg>
- [20] https://www.rockwestcomposites.com/media/catalog/product/cache/1/small_image/300x/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/i/m/img_0411_300x300.jpg

-
- [21] <https://sc01.alicdn.com/kf/HTB14WoFPpXXXXbOXFXXq6xXFXXXZ/220927373/HTB14WoFPpXXXXbOXFXXq6xXFXXXZ.jpg>
- [22] ECSS Secretariat, Requirements & Standards Division: Space engineering Insert Design Handbook: Noordwijk, Norveška
- [23] Hagan M., Rappolt J., Waldrop J.: Formula SAE Hybrid Carbon Fiber Monocoque/Steel Tube Frame Chassis, California, SAD, 2012.
- [24] <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0263822308003425-gr1.jpg>
- [25] *Aramis* korisnički priručnik, Njemačka, 2004.

PRILOZI

I. CD-R disc